



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

교육학석사 학위논문

유크라이트 Thiel Mountains 07014  
내 암편들의 분류 및 암석학적  
연구

Classification and petrology of clasts  
in Thiel Mountains 07014 eucrite

2017년 8월

서울대학교 대학원

과학교육과 지구과학전공

문 종 한

## 초 록

Thiel Mountains 07014(이하 TIL 07014)는 HED 중그룹(HED-clan)에 속하는 각력암(breccia)인 폴리믹트 유크라이트(polymict eucrite)로 다양한 종류의 암편(clast)들이 포함되어 있다 (박창근, 2009). 본 연구에서는 TIL 07014를 구성하는 암편의 암석학적 특징을 살펴보고 이를 기존에 연구된 다양한 유크라이트와 비교하여 암편의 기원을 규명하고자 하였다. 이러한 결과들을 종합하여 TIL 07014로 제작한 3개의 박편에서 총 18개의 암편을 기질부와 구분하였고, 18개의 암편은 조직에 따라 9개의 종류(구과상 조직 암편, 준오피틱 조직 암편, 입간 조직 암편, 세립질 입상 변정질 조직 암편, 중립질 입상 변정질 암편, 각력암질 암편, 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편, 침상 모양의 휘석으로 구성된 암편, 철-니켈 금속 철 함유 암편)로 분류하였다.

이들 암편의 성인적 연관성을 살펴보기 위해 조직을 바탕으로 나눈 9개의 종류를 조직, 광물 화학 조성, 전암 화학 조성 등을 비교하여 다섯 개의 그룹으로 분류하였다. 1) 두개의 구과상 조직 암편 중 한 암편이 조직과 휘석의 조성은 현무암질 유크라이트에 해당되고 전암 화학 조성에서 Na/Al (molar) 함량 비가 0.08 이상으로 스테닌 그룹 현무암질 유크라이트 기원 (1개, 총 2개의 구과상 암편 중 1개), 2) 두개의 구과상 조직 암편 중 한 암편, 준오피틱 조직 암편, 입간 조직 암편, 중립질 입상 변정질 암편, 각력암질 암편은 조직과 휘석의 조성은 현무암질 유크라이트에 해당되고 전암 화학 조성에서 Na/Al (molar) 함량 비가 0.05~0.07으로 메인 그룹 현무암질 유크라이트 기원 (12개), 3) 세립질 입상 변정질 암편은 Ca 함량이 낮은 휘석의 조성( $Mg\#(Mg/(Mg+Fe))$  in mole))이 일반적인 현무암질 유크라이트의 조성을 벗어나며, 후기 정출 광물인 실리카 동질이상체, 트로일라이트, Ca-인회석이 자형 또는 반자형으로 산출되고 높은 함량 비를 나타내는 재결정 된 충격 용융 액 기원(1개) 및 4) 철-니켈 금속 철 함유 암편은 암편의 금속 철 함량이 높으며 금속 철의 니켈

함량이 L 타입 또는 LL 타입의 콘드라이트의 금속 철과 유사한 콘드라이트 기원(1개)에 해당하며, 5) 집적 유크라이트와 현무암질 유크라이트 기원임을 지시하는 특징들이 모두 나타나는 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편 및 침상 모양의 휘석으로 구성된 암편 총 3개에 대해서는 명확한 기원을 규명하지 못하였다. 총 18개의 암편 중 메인 그룹 현무암질 유크라이트 기원에 해당되는 암편이 12개로 가장 많다는 사실은 TIL 07014가 주로 메인 그룹 현무암질 유크라이트로 이루어진 지역에서 각력화 과정을 겪었음을 지시한다.

T079-C1 암편은 본 연구에서 입간 조직 암편에 해당되어 현무암질 유크라이트의 광물 화학 조성 및 전암 화학 조성을 나타내나, 박창근. (2009)에서 분석한 해당 암편의 전암 희토류 원소 함량(rare earth elements)은 집적 유크라이트의 특징을 나타낸다. 이를 설명하고자 T079-C1 암편의 전암 희토류 원소 함량을 재현하였다. T079-C1 암편의 전암 희토류 원소 함량은 주비나스 유크라이트(Juvinas eucrite) 조성으로 설정한 기원암을 약 10%~20% 가량 부분 용융(partial melting)되어 만들어진 마그마가 85%~90% 가량 분별 결정(fractional crystallization) 되어 결정화된 암석의 전암 희토류 원소 함량과 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

**주요어** : 폴리믹트 유크라이트, 각력암, 암편.

**학 번** : 2014-22861



# 목 차

초 록 .....	I
표 목차 .....	V
그림 목차 .....	VI
제 1 장 서론.....	1
제 2 장 유크라이트의 분류에 관한 선행 연구 .....	4
2.1 HED 각력암의 분류 .....	4
2.2 유크라이트의 분류 및 특징 .....	5
2.3 폴리믹트 유크라이트 내 암편의 분류 및 특징 .....	7
제 3 장 시료 및 연구 방법 .....	12
3.1 연구 시료.....	12
3.2 연구 장비.....	12
3.3 모드 분석.....	13
제 4 장 결과.....	17
4.1 암편의 조직에 따른 분류 .....	17
4.1.1 구과상 암편 .....	18
4.1.2 준오피틱 암편 .....	19
4.1.3 입간 조직 암편 .....	20
4.1.4 입상 변정질 암편.....	20
4.1.5 각력암질 암편 .....	22
4.1.6 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편 .....	23
4.1.7 철-니켈 금속 철 함유 암편.....	24
4.2 TIL 07014 내 암편의 광물 화학 조성 및 열 변성 정도 .....	52

4.2.1 휘석의 조성 .....	52
4.2.2 사장석의 조성 .....	54
4.2.3 감람석의 조성 .....	55
4.2.4 금속 철 조성 .....	55
4.3 암편의 모드 조성 .....	72
4.4 암편의 전암 화학 조성.....	76
<b>제 5장 논의.....</b>	<b>81</b>
5.1 TIL 07014 내 암편의 기원 및 성인 .....	81
5.1.1 현무암질 유크라이트 기원 암편.....	81
5.1.2 세립질 입상 변정질 암편.....	82
5.1.3 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편.....	83
5.1.4 철-니켈 금속 철 함유 암편 .....	84
5.2 T079-C1 암편의 희토류 원소 함량에 대한 모델링 .....	86
5.2.1 분화된 마그마에서 기원한 경우 .....	87
5.2.2 변성 작용에 의한 부분 용융 과정을 거친 경우.....	88
5.2.3 부분 용융으로 생성된 마그마에서 결정화 되는 경우 .....	89
5.3 TIL 07014 의 각력화 및 혼합 과정 .....	98
<b>제 6장 결론 .....</b>	<b>101</b>
참고 문헌 .....	104
Abstract .....	114

## 표 목차

Table 2.1. Classification of HED .....	10
Table 2.2. Classification of cumulate and basaltic eucrite .....	11
Table 4.1. Classification of clasts in TIL 07014 based on their textures.....	26
Table 4.2. Summary of grain size, modal analysis, thermal and shock metamorphic degree of each type of clasts.....	27
Table 4.3. Average composition of high Ca-Pyroxene in clasts.....	56
Table 4.4. Average composition of low Ca-Pyroxene in clasts .....	58
Table 4.5. Average composition of plagioclase in clasts .....	60
Table 4.6. Average composition of olivine and metal in clasts.....	62
Table 4.7. Average composition of ilmenite in clasts.....	63
Table 4.8. Average composition of chromite in clasts.....	65
Table 4.9. Modal abundances of the 18 clasts in TIL 07014 .....	73
Table 4.10. Bulk composition of clasts analyzed by EDS .....	78
Table 4.11. Calculated bulk composition of clasts from mineral composition measure with EPMA and modal analysis data .....	79

## 그림 목차

Figure 2.1. Classification of HED breccia based on abundance of diogenite, basaltic eucrite, and cumulate eucrite fragments (Mittlefehldt, 2015).....	10
Figure 3.1. Transmitted-cross-polarized (XPL, A to C) and back-scattered-electron (BSE, D to F) images of the TIL 07014 thin sections studied .....	15
Figure 3.2. The output from $2 \times 2$ moving average method and thresholding images for high-Ca pyroxene, BSE images of whole and section of T081-C6.....	16
Figure 4.1. Images of variolitic type clasts .....	29
Figure 4.2. Images of detail textures of variolitic type clasts.....	30
Figure 4.3. Images of subophitic type clasts. ....	31
Figure 4.4. Images of detail textures and thermal metamorphic characteristics in subophitic type clasts .....	32
Figure 4.5. Images of shock metamorphic textures in subophitic type clast. ....	33
Figure 4.6. Images of intergranular type clasts. ....	34
Figure 4.7 Images of detail textures in intergranular type clast .....	35
Figure 4.8. Images of shock metamorphic textures intergranular type clasts. ...	36
Figure 4.9. Images of medium-grained granoblastic type clasts. ....	37
Figure 4.10. Images of detail textures and thermal metamorphic features in medium-grained granoblastic type clasts.....	38
Figure 4.11. Images of shock metamorphic textures in medium-grained granoblastic type clasts.....	39
Figure 4.12. Images of a fine-grained granoblastic type clast (T080-C4 clast)...40	
Figure 4.13. Images of detail textures and thermal metamorphic features in a fine-	

grained granoblastic clast (T080-C4 clast).....	41
Figure 4.14. Images of shock metamorphic textures in a fine-grained granoblastic clast (T080-C4 clast).....	42
Figure 4.15. Images of breccia clasts.....	43
Figure 4.16. Images of thermal metamorphic features in breccia clasts.....	44
Figure 4.17. Images of shock metamorphic textures in breccia clasts.....	45
Figure 4.18. Images of pyroxene lath clasts. ....	46
Figure 4.19. Images of detail textures in pyroxene lath clasts.....	47
Figure 4.20. Images of shock metamorphic textures in pyroxene lath clasts. ....	48
Figure 4.21. Images of a Fe-Ni metal bearing clast (T081-C6 clast).....	49
Figure 4.22. Images of detail textures of a Fe-Ni metal bearing clast(T081-C6)... .....	50
Figure 4.23. Images of shock metamorphic and weathering textures in a Fe-Ni metal bearing clast (T081-C6 clast).....	51
Figure 4.24. Pyroxene compositions of various textural groups.....	67
Figure 4.25. Pyroxene compositions of various textural groups.....	68
Figure 4.26. Al-Cr-Ti ternary diagrams of pyroxenes in the clasts studied. ....	69
Figure 4.27. An contents of plagioclase in the clasts studied. ....	70
Figure 4.28. Ni versus Co compositions in kamacite of T081-C6 clast, measured with EMPA....	71
Figure 4.29. Co and Ni compositions of a taenite grain found in T081-C6 clast, measured with EMPA.....	71
Figure 4.30. Pyroxene-plagioclase-silica ternary diagram of modal abundance of clasts studied with previously measured eucrites from Mayne et al. (2009), Delaney	

et al. (1984), Yamaguchi et al. (2001), and Mittlefehldt. (2015). ....	75
Figure 4.31. Na/Al (molar) versus Mg# for calculated bulk composition of eucrites and calculated bulk composition of clasts in TIL 07014 with previously measured eucrites from Mittlefehldt (2015).....	80
Figure 5.1. An content of plagioclase versus vs En content of low-Ca pyroxene of clasts studied (Mittlefehldt., 2015).....	85
Figure 5.2. CI chondrite-normalized rare earth elements(REE) abundance of T079-C1 clast measured from Park. (2009) with basaltic and cumulate eucrites previous measured from Barrat et al. (2000).....	91
Figure 5.3. The CI-normalized REE abundance of T079-C1 clast (red line) and calculated REE abundances (black and grey lines) of rock crystallized from various magma with equilibrium crystallization(A) or fractional crystallization(B).....	92
Figure 5.4. The CI-normalized REE abundance of T079-C1(red line) and residual eucrites (black and grey lines) calculated from partial melting with the extraction of partial melt of various source rocks.....	94
Figure 5.5. The CI-normalized La versus (Yb/La) <sub>n</sub> . ....	95
Figure 5.6. The CI-normalized Eu versus (Yb/La) <sub>n</sub> .....	96
Figure 5.7. The CI-normalized Eu versus La. ....	96
Figure 5.8. The CI-normalized REE patterns of solid composition from fractional crystallized of partial melt from Juvinas eucrite. ....	97

## 제 1 장 서론 (Introduction)

본 연구는 폴리믹트 유크라이트 Thiel Mountains 07014(이하 TIL 07014)를 구성하는 암편의 암석학적 특징에 관한 연구이다. 이 장에서는 본 연구의 목적을 설명하는데 필요한 배경지식으로서 폴리믹트 유크라이트, HED 운석의 정의 및 TIL 07014의 선행 연구인 박창근, (2009)에 대해서 먼저 간략히 살펴보고자 한다. 본 연구에서 운석에 관한 한국어 용어 기술은 최변각, (2009a, 2009b)에서 제시된 것을 이용하였다.

운석은 화성 활동 여부에 따라 화성 활동을 경험하지 않은 미분화 운석(primitive meteorites)과 화성 활동을 경험한 분화 운석(differentiated meteorites)으로 구분한다 (Weisberg *et al.*, 2006). 세립질의 사장석과 피저나이트(pigeonite)으로 구성되어 분출암 조직을 나타내는 유크라이트(eucrite)과 사방휘석으로 구성되며 집적암 조직을 보이는 디오제나이트(diogenite)는 분화 운석에 속한다. 두 종류는 암석학적 특징 및 산소동위원소 조성을 바탕으로 동일한 모천체에서 기원한 것으로 알려져, 두 종류의 운석이 섞여있는 각력암인 하워드다이트(howardite)와 함께 HED-중그룹(HED-clan)으로 묶어 분류된다 (Clayton and Mayeda, 1996; Papike *et al.*, 2003; Mittlefehldt, 2015).

HED 중그룹의 운석은 태양계 생성 초기에 분화 과정을 거쳐 생성되었으며, HED 중그룹의 운석의 모천체로 유력한 소행성체로는 약 500km의 직경을 갖는 4Vesta 이다 (e.g. Carlson and Lugmair, 2000, and reference therein; Drake, 2000; Misawa *et al.*, 2005)Drake, 2000). 따라서 HED 운석은 태양계 생성 초기에 4Vesta 처럼 작은 크기의 소행성체에서 이루어진 화성 활동을 보여줄 수 있는 중요한 시료이다 (e.g. Nyquist *et al.*, 1997).

HED 중그룹의 운석은 크게 비각력암질(unbrecciated)와 각력암질(brecciated)으로 구분되고, 각력암질은 HED 각력암(HED breccia)라고 부르고 이질적인 기원의 암편들로

구성된 폴리믹트(polymict)와 동일 기원의 암편들로 구성된 모노믹트(monomict)로 다시 세분한다 (e.g. Bischoff *et al.*, 2006; Delaney *et al.*, 1981; Llorca *et al.*, 2009; Mittlefehldt, 2015). 폴리믹트 유크라이트(polymict eucrite)을 구성하는 암편의 대부분은 다양한 화성 활동 과정을 거쳤음으로, 하나의 폴리믹트 유크라이트 내 암편을 연구함으로써 모천체의 다양한 화성 활동에 대해 연구할 수 있다 (e.g. Patzer *et al.*, 2003; Llorca *et al.*, 2009; van Drongelen *et al.*, 2016). 모천체에서 다양한 기원의 암편들이 하나의 각력암으로 모이는 동안 이동(mass transport process), 다져짐 작용(lithification process), 고결 작용(solidification process)등의 일련의 과정을 거치므로, 폴리믹트 유크라이트를 연구함으로써 이러한 일련의 과정 등에 이해할 수 있다 (e.g. Fuhrman and Papike, 1981).

TIL 07014는 2008년 제2차 대한민국 남극 운석 탐사를 통해서 회수된 폴리믹트 유크라이트이다 (박창근, 2009). TIL 07014의 선행 연구에서는 운석의 분류, 운석의 전체적인 특징 및 각력화 과정에 중점을 두어 연구가 이루어졌고, 구체적인 연구 결과들은 아래와 같다.

- 1) TIL 07014는 현무암질 유크라이트 쇄설물과 반력암질 유크라이트 쇄설물이 혼재된 폴리믹트 유크라이트이다
- 2) TIL 07014에서 오피틱(ophitic texture), 준오피틱(subophitic texture), 구과상(variolitic texture) 및 집적 조직(cumulate texture)등의 다양한 화성 조직이 관찰된다.
- 3) TIL 07014의 대부분 영역의 휘석에서 열 변성 작용을 지시하는 용리 조직(exsolution texture)과 클라우딩 조직(clouding texture)이 발달되었고, 일부 영역에서는 Fe-Mg 누대구조가 관찰된다.
- 4) 깨짐(fracture), 변형된 쌍정(deformed twin), 파동소광(undulatory extinction), 판상 깨짐(planar fracture), 재결정 되지 않은 충격 용융 맥(impact melt),



각력암 내 각력암(breccia in breccia) 조직 등의 다양한 충격 변성 작용을 지시하는 조직들이 관찰된다

5) 반려암질 유크라이트 암편은 전암 희토류 원소 함량이 기존에 연구되어 잘 알려진 반려암질 유크라이트와 유사하나 광물 화학 조성은 전형적인 현무암질 유크라이트의 조성에 해당된다.

6) TIL 07014는 심부에 위치했던 반려암질 유크라이트 암편이 충격 작용을 거쳐 표층의 현무암질 유크라이트의 암편과 섞이고 변성 작용을 받는 과정을 거쳐 생성되었다.

본 연구에서는 TIL 07014의 각력화 과정을 재구성하는 것을 중심으로 연구가 이루어진 박창근(2009)에서 많이 다루어진 앓은 개개의 암편을 중심으로 연구하였다. 개개의 암편에 대해서 비슷한 특징을 갖는 암편을 묶었고, 이를 기존에 연구된 유크라이트와 비교하여 기원을 알아보고자 하였다. 광학 현미경과 주사전자현미경(scanning electron microscope; SEM), 전자현미분석기(electron probe micro-analyzer; EPMA)을 이용해 암편의 관찰 및 구성 광물의 조성을 분석하였다. 본 연구에서 파악한 암편들의 기원 및 성인을 통해 모천체의 다양한 화성 활동을 확인할 수 있었다.

## 제 2 장 유크라이트의 분류 관한 선행 연구

### (Previous studies for classification of eucrite)

본 연구의 주요한 목적은 TIL 07014 를 구성하는 암편을 분류하고 기존에 연구된 유크라이트와 비교하여 기원을 밝히는 것이다. 이 장에서는 연구 목적에 필요한 배경 이론을 정리하였다. 먼저 HED 각력암의 분류기준 및 폴리믹트 유크라이트의 구체적인 정의에 대한 소개는 “2.1 HED 각력암의 분류”에 정리하였다. TIL 07014 의 암편과 비교가 이루어지는 기존에 연구된 유크라이트에 관한 배경 이론은 “2.2 유크라이트의 분류 및 특징”에, TIL 07014 의 암편을 분류하고 명명하는데 필요한 배경 이론은 “2.3 폴리믹트 유크라이트 내 암편의 분류 및 특징”에 각각 정리하였다

#### 2.1 HED 각력암의 분류

HED 중그룹에 속하는 운석은 각력암질(brecciated)과 비각력암질(unbrecciated)으로 나누어지며, 대부분은 각력암 형태로 발견된다 (Mittlefehldt, 2015; Bischoff *et al.*, 2006, Table 2.1). HED 중그룹의 각력암질 운석은 다시 모노믹트 각력암(monomict breccia)과 폴리믹트 각력암(polymict breccia)으로 구분되고, 폴리믹트 각력암은 구성하는 암편들의 종류에 따라 다시 세분된다 (Delaney *et al.*, 1984, Fig. 2.1). 폴리믹트 각력암은 디오제나이트 암편(diogenite clast), 현무암질 유크라이트 암편(basaltic eucrite clast), 집적 유크라이트 암편(cumulate eucrite clast) 함량 비에 따라 다시 세분된다. 디오제나이트 기원 암편의 함량 비가 10%~90% 이면 하위다이트, 90% 초과하면 폴리믹트 디오제나이트로 분류된다. 디오제나이트 기원 암편이 10% 미만인 경우, 90% 이상의 유크라이트 기원 암편 중 현무암질 유크라이트 기원 암편의 함량 비가 10% 미만이면 폴리믹트 집적 유크라이트, 10%~90% 폴리믹트

유크라이트, 90% 이상이면 폴리믹트 현무암질 유크라이트로 다시 세분된다.

## 2.2 유크라이트의 분류 및 특징

유크라이트는 크게 집적 유크라이트(cumulate eucrite)와 현무암질 유크라이트(basaltic eucrite)로 구분되고, 현무암질 유크라이트는 다시 스테넨 경향(Stannern trend)과 메인 그룹-누에보 라레도 경향(Main group-Nuevo Laredo trend)으로 세분된다 (Consolmagno and Drake, 1977; Stopler, 1977).

집적 유크라이트와 현무암질 유크라이트는 구성 광물의 결정 크기와 조직, 광물 화학 조성(e.g. 휘석의  $Mg\#(Mg/(Mg+Fe) \text{ in mole})$ ), 전암 희토류 함량으로 구분된다 (e.g. Barrat *et al.*, 2000; Hsu and Coraz, 1996, 1997; Mayne *et al.*, 2009; McSween *et al.*, 2012; Mittlefehldt, 2015, Table 2.1). 먼저 결정 크기와 조직의 경우, 집적 유크라이트는 조립질(1mm~5mm)의 결정들로 구성되어 등립상 조직(equi-granular texture)등의 심성암 조직을 이루며, 현무암질 유크라이트는 작은 크기(<1mm)의 결정들로 구성되어 오피틱 조직(ophitic texture), 준 오피틱 조직(sub-ophitic texture), 골격 조직(skeletal texture) 등의 분출암 조직을 나타낸다.

광물 화학 조성의 경우 현무암질 유크라이트의 Ca 함량이 낮은 휘석의 조성( $Mg\# 32.2\sim45.8$ )은 집적 유크라이트( $Mg\# 42.4\sim66.1$ )에 비해서 상대적으로 Mg 함량이 낮다 (Mittlefehldt, 2015; Mittlefehldt and Lindstorm, 1993). 집적 유크라이트에서 Yamato-791195(이하 Y-791195)를 제외하면 Ca 함량이 낮은 휘석의 조성은  $Mg\# 48.5\sim66.1$ 로 현무암질 유크라이트와 뚜렷이 구분된다.

전암 희토류 원소(rare earth elements; REE) 함량을 미분화 운석 중 하나인 CI 콘드라이트(CI-chondrite)로 표준화 하였을 때 집적 유크라이트는 경희토류 원소(light rare earth elements; LREE)에서 중희토류 원소(heavy rare earth elements; HREE)로 갈수록 함량이 증가하고 양의 유로피움 이상(positive Eu anomaly)이

나타난다 (e.g. Barrat *et al.*, 2000; Hsu and Coraz, 1996, 1997). 현무암질 유크라이트의 전암 희토류 원소 함량의 경향성은 집적 유크라이트와 반대이다.

현무암질 유크라이트는 전암 화학 조성에서 불호정 원소(incompatible element) 원소 함량에 따라 다시 메인 그룹(main group), 누에보 라레도 그룹(Nuevo Laredo group), 스테넨 그룹(Stannern group)으로 세분된다 (Consolmagno and Drake, 1977; Stopler, 1977). 메인 그룹과 누에보 라레도는 같은 경향성을 보여 메인 그룹-누에보 라레도 경향(Main group-Nuevo Laredo trend)으로 묶고, 스테넨 그룹은 스테넨 경향(Stannern trend)으로도 칭한다. 스테넨 경향의 유크라이트는 상대적으로 메인 그룹-누에보 라레도 경향의 유크라이트에 비해 불호정 원소인 란타늄(La), 티타늄(Ti) 함량이 높고 Na/Al (molar)의 함량 비도 높다 (e.g. Consolmagno and Drake, 1977; Delaney *et al.* 1981; Ikeda and Takeda, 1985; Mittlefehldt., 2015; Stopler, 1977). 예를 들어 전암 화학 조성 중 Na/Al 함량 비의 경우 Mg#과 함께 비교하면 누에보 라레도 그룹은 Mg# 35 미만이고 Na/Al 함량 비가 0.06~0.08 이며, 메인 그룹은 Mg# 35 이상이고 Na/Al 함량 비는 0.08 이하이다. 스테넨 그룹(Stannern group)은 메인 그룹과 유사한 Mg#를 갖으나 Na/Al 함량 비가 높아 0.08 이상으로 구분된다.

메인 그룹-누에보 라레도 경향의 유크라이트와 스테넨 경향의 유크라이트는 휘석과 사장석의 조성으로도 구분되어, 유크라이트를 구성하는 휘석의 En 함량이 동일할 때 메인 그룹-누에보 라레도 경향의 유크라이트를 구성하는 사장석의 An 함량이 스테넨 경향의 유크라이트에 비해 높다 (Delaney *et al.* 1981). 유크라이트를 구성하는 휘석의 En 함량이 약 45 일 때, 메인 그룹-누에보 라레도 경향의 유크라이트 내 사장석의 An 함량은 약 90 이고 스테넨 경향의 유크라이트의 사장석 An 함량은 약 83 이다. Ca 함량이 낮은 휘석의 En 함량이 감소함에 따라 사장석의 An 도 감소하여 Ca 함량이 낮은 휘석의 En 함량이 약 12 일 때는 메인 그룹-누에보 라레도 경향은 80, 스테넨 경향은 65 까지 감소하여 차이가 더 뚜렷해진다.

## 2.3 폴리믹트 유크라이트 내 암편의 분류 및 특징

폴리믹트 유크라이트 내 암편의 암석학적 연구 및 전암 화학 조성에 관하여 많은 연구가 이루어졌으며, 이러한 연구 사례 및 결과들은 Bischoff *et al.* (2006), Delaney *et al.* (1984), Mittlefehldt (2015) 에 잘 정리되어 있다. 대부분의 폴리믹트 유크라이트 암편은 현무암질 유크라이트 또는 집적 유크라이트 기원이며, 그 외에 충격 용융 액(impact melt) 기원, 콘드라이트 기원 등이 보고되었다. 선행 연구에서는 암편을 조직(e.g., 세립질 암편, 조립질 암편, 입상 변정질 암편) 또는 성인(e.g. 현무암질 유크라이트 기원 암편, 집적 유크라이트 기원 암편, 충격 용융 액 기원 암편 등) 으로 분류하고, 명명하였다 (e.g. Gardner-Vandy *et al.*, 2011; Llorca *et al.*, 2009; Patzer *et al.*, 2003; Singerling *et al.*, 2013; van Drongelen *et al.*, 2016).

기존에 연구에서 조직에 따라 분류한 암편의 종류를 정리하면 1) 구과상 조직 암편(variolitic clast), 2) 준오피틱 암편(subophitic clast), 3) 오피틱 암편(ophitic clast), 4) 입간 조직 암편(intergranular clast) 5) 집적 조직 암편(cumulate clast), 6) 입상 변정질 암편(granoblastic clast), 7) 각력암질 암편(breccia clast) 등이 대표적인 종류이며, 그 외 8) 조립질 사방 휘석 암편(coarse orthopyroxene clast), 9) 유리질 암편(glassy clast), 10) 검은색 세립질 암편(dark fine-grained clast), 11) 양휘석 암편(two pyroxene clast) 등이 있다 (e.g. Bischoff *et al.* 2006; Delaney *et al.* 1984; Gardner-Vandy *et al.*, 2011; Llorca *et al.*, 2009; Mittlefehldt, 2015; Patzer *et al.*, 2003; Singerling *et al.*, 2013; van Drongelen *et al.*, 2016). 이 절에서는 대표적인 종류(1~7)에 대해서 살펴보고자 한다.

구과상 조직 암편은 Macibini (Buchanan *et al.*, 2000a), Pasamonte (Mittlefehldt *et al.*, 2017) 등의 폴리믹트 유크라이트(polymict eucrite)에서 보고되었다. 구과상 조직은 모노믹트 현무암질 유크라이트 (e.g. Millbillillie (Yamaguchi *et al.*, 1994), Piplia Kalan (Buchanan *et al.*, 2000b))와 비각력암질 현무암질 유크라이트 (e.g. Lewis Cliff 88010, Allan Hills A81001 (이하 ALH A81001, Mayne *et al.*, 2009))에서

보고되어 현무암질 유크라이트에서 기원한 것으로 생각되나, 일부 연구(e.g. Bischoff *et al.*, 2006; Barrat *et al.*, 2003; Yamaguchi *et al.*, 1994) 이와 유사한 조직의 암편을 충격 용융 액(impact melt)의 기원으로 해석한다.

준오피틱 암편과 오피틱 암편은 폴리믹트 유크라이트 North West Africa 5232(이하 NWA 5232, van Drongelen *et al.*, 2016), North West Africa 3368(Gardner-Vandy *et al.*, 2011), Petersburg(Buchanan *et al.*, 1997), Puerto Lapice(Llorca *et al.*, 2009) 등에서 보고되었다. 준오피틱 및 오피틱 조직은 현무암질 유크라이트의 대표적인 조직이며 비각력암질 현무암질 유크라이트(e.g. Pecora Escarpment 91078 (Mayne *et al.*, 2009)) 등에서 관찰되어, 준오피틱 및 오피틱 암편은 현무암질 유크라이트에서 기원한 것으로 알려져 있다 (Bischoff *et al.*, 2006).

입간 조직 암편(intergranular clast)은 준오피틱 조직과 유사하나 하나의 휘석 결정이 사장석 결정을 포획된 것이 아니라 여러 개의 휘석 결정들이 둘러 싸고 있는 조직을 보여준다. 입간 조직 암편은 폴리믹트 유크라이트 Yamato-790266(이하 Y-790266, Takeda *et al.*, 1983), Allan Hills A76005(이하 ALHA 76005; Grossman *et al.*, 1981)에서 보고되었다. 입간 조직은 모노믹트 현무암질 유크라이트(e.g. Piplia Kalan (Shukla *et al.*, 1997))에서 관찰되고 Y-790266 와 ALHA 76005 내 입간 조직 암편의 광물 화학 조성은 현무암질 유크라이트에 해당한다.

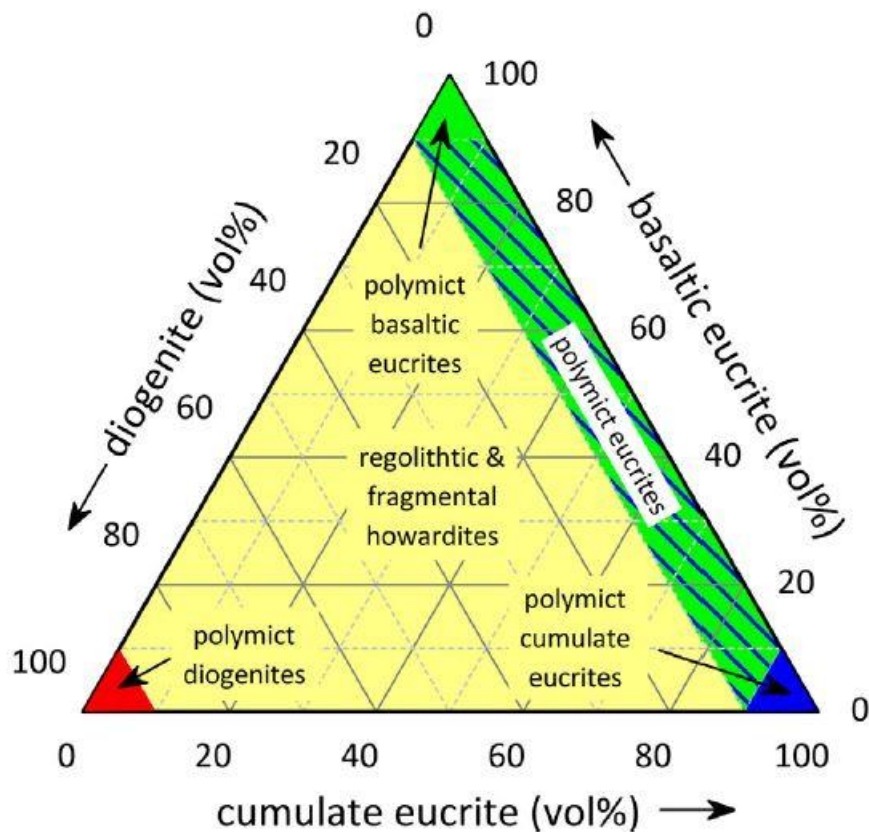
집적 조직 암편(cumulate clast)은 1mm 이상의 입방체(equant)인 휘석과 사장석 등이 등립질 조직(equi-granular texture)를 이루며 폴리믹트 유크라이트 NWA 5232, Puerto Lapice 등에서 보고되었다 (e.g. Llorca *et al.*, 2015; van Drongelen *et al.*, 2016). 집적 조직(cumulate texture)은 집적 유크라이트 (e.g. Moama, Moore County, Binda, 에서 관찰되는 대표적인 조직이다 (Mayne *et al.*, 2009; Barrat *et al.*, 2000). 따라서 집적 조직 암편은 집적 유크라이트에서 기원한 것으로 생각된다 (Bischoff *et al.*, 2006).

입상 변정질 암편은 입상 변정질 암편은 폴리믹트 유크라이트 Yamato-791960(Takeda, 1991)와 모노믹트 현무암질 유크라이트 Asuka-881388(Yamaguchi *et al.*, 2007) 등에서 보고되었다. 입상 변정질 암편의 결정 크기는 다양하며 넓은 범위로 나타나며 재결정 작용 이전의 결정 크기에 따라 정해진다 (e.g. Patzer *et al.*, 2003; van Drongelen *et al.*, 2016). 세립질 입상 변정질 암편은 세립질(<300  $\mu\text{m}$ )의 현무암질 유크라이트 또는 충격 용융 액이 변성 작용을 받아 생성된 것으로 알려져 있다 (e.g. Buchanan *et al.*, 2000b; Patzer *et al.*, 2003; van Drongelen *et al.*, 2016).

각력암질 암편(breccia clast)은 암석 또는 광물 파편과 세립질의 기질부와 혼재되어 각력암 내 각력암(breccia in breccia) 조직을 이룬다 (Bischoff *et al.*, 2006, Metzler *et al.*, 1995). 각력암질 암편은 각력화 과정 받아 생성되므로 HED 운석 중 각력암질 HED 운석(e.g. 하워드다이트, 폴리믹트 유크라이트 등)에서 보고되었다. 각력암질 암편의 생성과정은 1) 각력암질 암편의 기원이 되는 각력암이 생성 충격 작용을 받아 각력암질 암편으로 파쇄, 2) 각력암질 암편은 다른 암편 및 기질부와 혼재된 후 다져짐 작용(lithification process) 및 고화 작용(consolidation process)을 받아 각력암질 암편이 포함되는 각력암을 형성, 3) 새로운 각력암이 충격 작용을 받아 모체에서 떨어져 지구에 낙하 등의 일련의 과정을 따른다. 따라서 각력암질 암편이 다른 암편 및 광물 파편들과 혼재되는 과정과 모체에서 떨어지는 과정에서 충격 작용이 필요하므로 각력암질 암편은 해당 암편이 최소 2회 이상의 충격 작용을 겪었음을 지시한다.

**Table 2.1.** Classification of HED breccia (Mittlefehldt, 2015; Bischoff *et al.*, 2006; Delaney *et al.*, 1984).

Unbrecciated		Unbrecciated diogenite
		Unbrecciated eucrite
Brecciated	Monomict	Monomict diogenite
		Monomict eucrite
	Polymict	Polymict diogenite
		Polymict eucrite
		Howardite



**Figure 2.1.** Classification of HED breccia based on abundance of diogenite, basaltic eucrite, and cumulate eucrite fragments (Mittlefehldt, 2015). Polymict HED breccia consists of various type fragments. Depending on relative abundances of diogenite, basaltic eucrite and cumulate eucrite fragments, polymict HED breccias are classified as polymict diogenite, howardite, polymict basaltic eucrite, polymict eucrite, and polymict cumulate eucrite. See text for details.



**Table 2.2.** Classification of cumulate and basaltic eucrite (Mayne *et al.*, 2009; Duke and Silver, 1967; Yamaguchi *et al.*, 1997; Howard *et al.*, 2002; Mittlefehldt, 2015).

Type	Grain Size(mm)	Texture	Mg# of pyroxene	REE pattern
Cumulate	0.5~5	Equi-granular	48.5~66.1 (except Y-791195)	Eu (+) positive slope
Basaltic	0.1~1	Ophitic, Variolitic Skeletal, Granoblastic	32.2~45.8	Eu (-) negative slope or flat

## 제 3 장 시료 및 연구 방법

### (Sample and Analytical Methods)

#### 3.1 연구 시료

TIL 07014 는 미정질의 현무암질 쇄설물(basaltic clast), 반력암질 쇄설물(gabbroic clast)과 두 종류의 쇄설물이 혼재된 혼합체(mixed clast)로 구성되고 그 중 현무암질 쇄설물이 대부분을 차지한다 (박창근, 2009). 본 연구에서 TIL 07014 로 제작한 박편 SNU-T079, SNU-T080, SNU-T081 을 이용하였으며, SNU-T079 은 반력암질 쇄설물과 현무암질 쇄설물을 함께 포함하고, SNU-T080 와 SNU-T081 은 혼합체가 대부분을 차지한다 (Fig. 3.1). 박편 하나의 면적은 약 1.5 cm<sup>2</sup>이다.

#### 3.2 연구 장비

서울대학교 지구과학교육과에 설치된 편광 현미경(OLYMPUS CX-31)을 이용해 암편의 조직을 관찰했다. 주사 전자 현미경(scanning electron microscope; SEM) 및 주사 전자 현미경에 부착된 에너지 분산 X선 분광 분석기(energy dispersive spectroscopy; EDS)을 이용해 암편을 자세히 관찰하고 광물의 조성에 대해 반정량 분석을 하였다. 주사 전자 현미경 및 분광분석기는 서울대학교 지구과학교육과(SEM: JEOL JSM-6380A; EDS: JEOL JED-2300)와 해양 연구원 부설 극지연구소(SEM: JEOL JSM-6610; EDS: INCA X-act 51-ADD0013)에 설치된 장비를 사용하였다. 주사 전자 현미경의 분석 조건은 가속 전압: 15kV, 작업 거리(working distance): 10mm 이다. 에너지 분산 X-선 분광분석기를 이용하여 암편의 전암 화학 조성을 추정하고자 할 때 분석 시간을 2분으로 설정하였으며, 이때 검출 한계는 원소의 함량에 따라 약 0.3~1.5 wt.% 이다.

해양 연구원 부설 극지연구소의 전자 현미 분석기(electron probe micro-analyzer; EPMA, JEOL JXA-8530F)를 이용하여 광물의 화학 조성을 정량 분석하였다. 분석 조건은

가속 전압: 15kV, 전자 빔의 전류: 10nA이며, 빔 크기는 장석류를 제외한 광물은 점(spot) 분석을 하였고 장석류에 대해서는 3 $\mu$ m 크기로 설정하였다. 철-니켈 금속 철의 경우 가속 전압을 20kV로 설정하였다. 분석 시간은 나트륨(Na)과 칼륨(K)에 대해서는 바탕 값 신호 분석은 5초, 본 신호 분석은 10초로 분석하였으며, 그 외 원소들은 바탕 값 신호(background signal) 분석은 10초, 본 신호(peak signal) 분석은 20초로 설정하였다. 각 원소에 대한 검출 한계는 산화물은 원소 종류에 따라 0.01~0.03 wt.%이며, 철-니켈 금속 철에 대해서는 원소의 종류에 상관 없이 0.01 wt.% 이다.

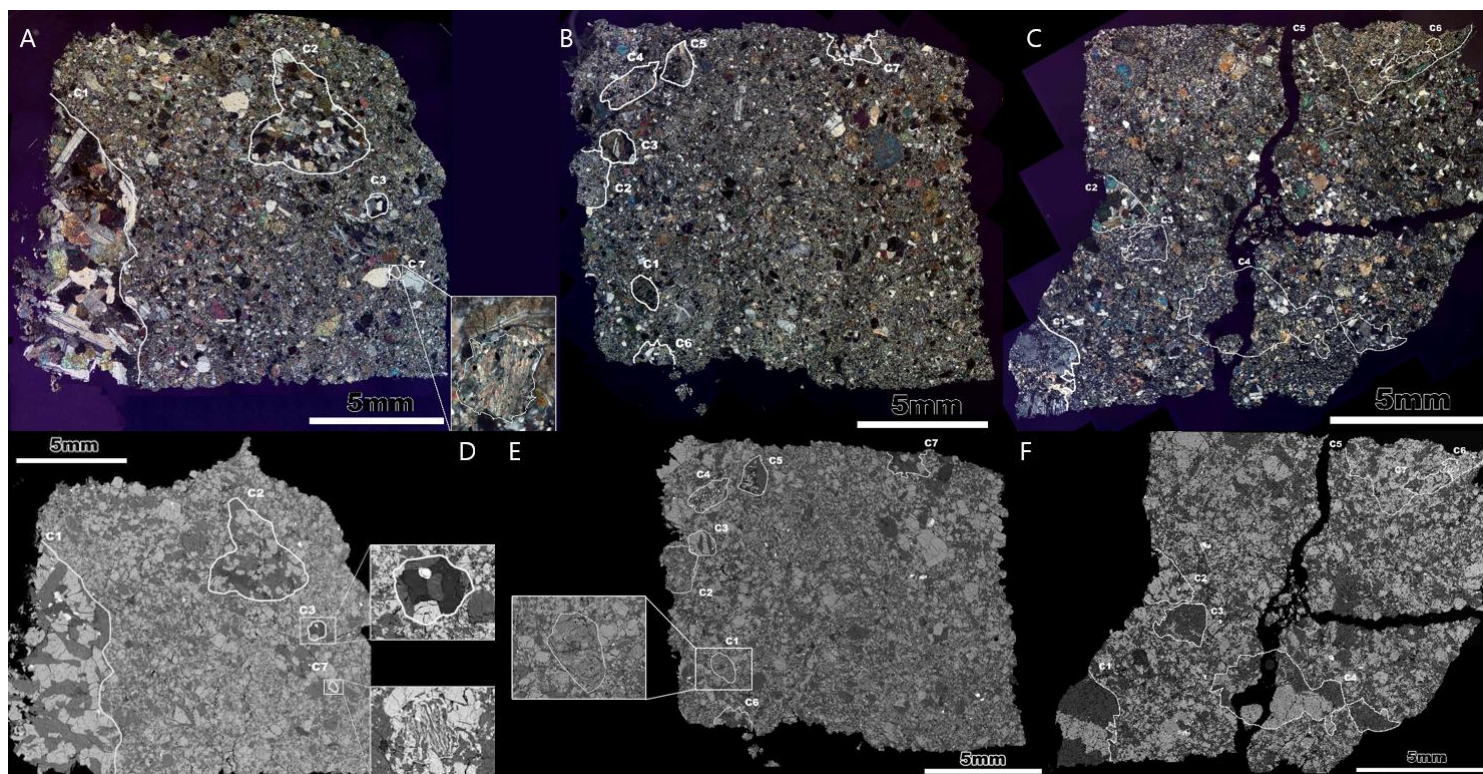
### 3.3 모드 분석

모드 분석(modal analysis)은 암석 내 구성 광물의 함량을 파악하는 것으로 암석의 연구 및 기재에서 중요한 요소이다. 모드 분석은 전통적으로 광학 현미경으로 박편을 보면서 단위 격자를 일정한 간격으로 옮겨가면서 세는 방법으로 이루어졌다. 최근에는 육안 관찰 외에도 주사 전자 현미경(SEM) 또는 전자 현미 분석기(EPMA)를 이용하여 모드 분석이 이루어지며, 이미지 처리 프로그램 (e.g. ImageJ, Mutispec ®; Lydon, 2005)을 함께 사용할 수 있어 기존 방법에 비해 시간이 적게 걸린다 (Fandrich *et al.*, 2007; Maloy and Treiman, 2007).

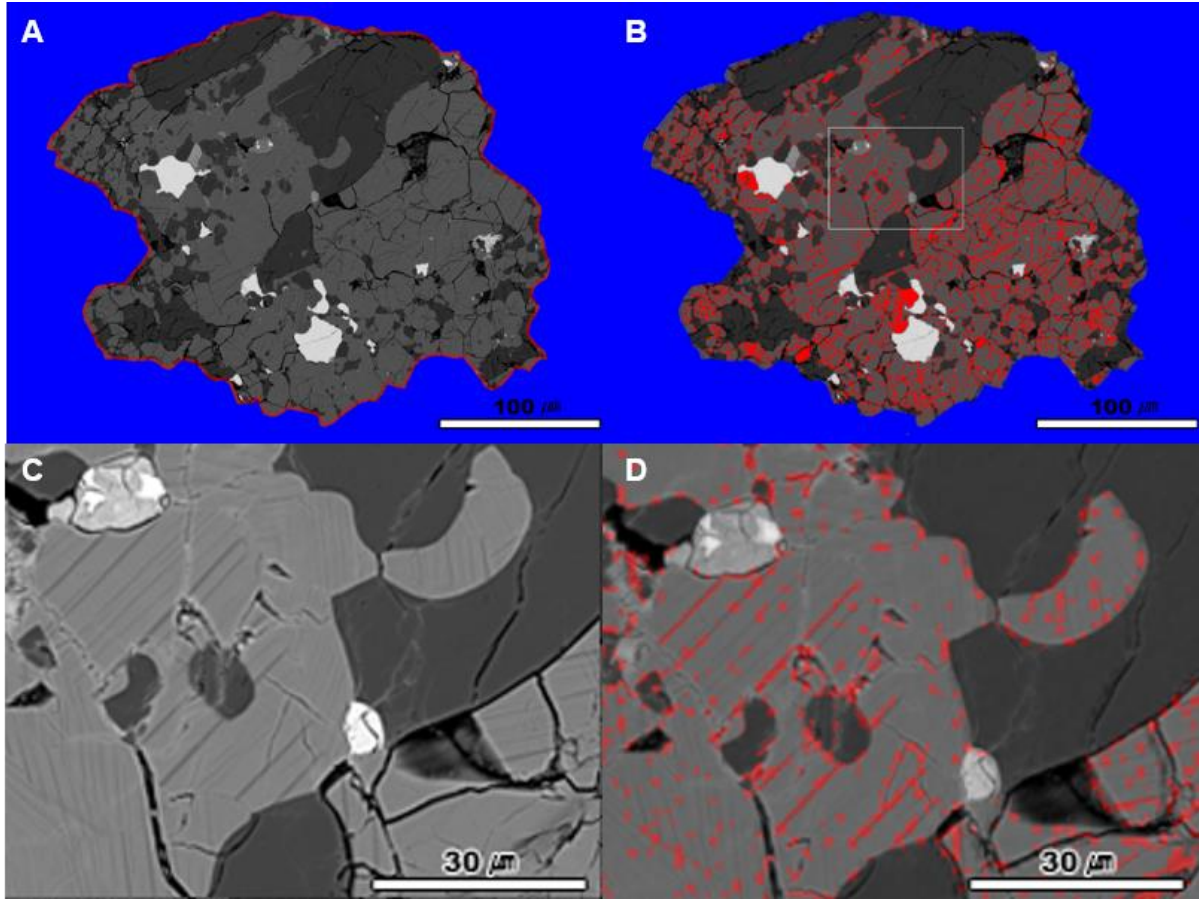
본 연구에서는 주사 전자 현미경을 이용해 모드 분석을 실시하였으며, 후방 산란 전자 영상(back scattered electron image; BSE image), X-선 원소 함량 영상(X-ray element map image)과 이미지 처리 프로그램인 ImageJ 을 이용했다. 분석은 주로 후방 산란 전자 영상을 이용하였고 Ca 함량이 낮은 휘석과 구분이 어려운 Ca-인회석(Ca-phosphate)은 X-선 원소 함량 영상은 후방 산란 전자 영상을 이용했다. 본 연구에서는 ImageJ 을 이용한 구체적인 모드 분석 방법은 Lydon (2005)을 참고했다.

후방 산란 전자 영상과 X선 원소 함량의 영상에서 실제 광물의 색상 값과 다른 값을 갖는 화소로 인해 모드 분석에서 오차가 발생한다. 일부 화소에서 실제와 다른 색상값을 갖는 이유는, 주사 전자 현미경에서 영상을 얻는 동안, 한 화소에 해당되는 영역에 전자 빔(electron beam)이 주사 되는 시간(<5ms)은 매우 짧기 때문이다. 짧은 시간 동안의 전자 현미경의 상태의 미세한 변화는 전자 빔이 주사 되는 영역에 해당하는 화소의 색상 값의 오차를 유발한다 이러한 화소에 의한 모드 분석에서의 오차를 줄이고자 여러 개의 화소를 묶어 하나의 큰 화소로 묶고, 큰 화소의 색상 값은 여러 화소의 색상 값의 평균값으로 만드는 이동 평균법(moving average method)을 Lydon. (2005)에서 제시한 방법에 추가하여 적용하였다. 본 연구에서는 4 개의 화소를 묶어 1 개의 큰 화소로 되도록 하였다. 그 결과 이동 평균법을 적용한 영상을 이용한 모드 분석에서 두께가  $0.5\ \mu\text{m}$  내외인 용리 엽리까지 구분하여 분석할 수 있다 (Fig. 3.2 A~B).

Lydon. (2005) 에서 암편 내 특정 영역을 설정하여 광물 마다 고유의 색상 값 범위를 구하고 이를 암편 전체 적용해 모드 분석을 하며, 이때 특정 영역을 학습 영역이라 칭한다. 학습 영역에 따라 광물의 색상 값의 범위에서 편차가 발생해 모드 분석의 결과에서도 편차가 발생한다. 본 연구에서는 암편 마다 8 개의 학습 영역을 설정하였고, 학습 영역에 따라 모드 분석 결과의 편차는 전체 함량에 대해 약 10% 이다 (Fig. 3.2 C~D).



**Figure 3.1.** Transmitted-cross-polarized (XPL, A to C) and back-scattered-electron (BSE, D to F) images of the TIL 07014 thin sections studied. (A and D), (B and E) and (C and F) for the thin sections, SNU-T079, T080 and T-081, respectively. Total 18 clasts in this study are shown with white outlines and clast numbers: 4 clasts in SNU-T079, 7 clasts in SNU-T080 and 7 clasts in SNU-T081.



**Figure 3.2.** The output from  $2 \times 2$  moving average method and thresholding images for high-Ca pyroxene: BSE images of whole and section of T081-C6. (A and C) are original BSE images, and (B and D) are the output from  $2 \times 2$  moving average method of original images. (C and D) are high magnified images of a box in (B). Thresholding for high-Ca pyroxene can distinguish the exsolution lamellae of which thickness is thicker than about  $0.5\mu\text{m}$ . Thus the mode analysis can measure the mineral which is bigger than about  $0.5\mu\text{m}$ .

## 제 4 장 결과 (Results)

### 4.1 암편의 조직 및 분류

TIL 07014는 다양한 종류의 암편으로 구성된 각력암 조직을 뚜렷이 보임에도 불구하고 각 암편들이 구성광물에서 큰 차이가 없어 경우에 따라서는 암편과 암편, 암편과 기질의 경계를 찾는 것이 어렵다. 본 연구에서 하나의 암편은 1) 파쇄된 세립질 결정들로 구성된 기질부와 광물 크기, 조직 등에서 뚜렷이 구분되면서, 2) 암편의 경계가 끊어지지 않고 연결된 폐곡선을 갖는 경우로 제한하였으며, 3) 하나의 광물 결정만으로 이루어진 경우 조직을 알 수 없어 광물 결정의 크기에 상관 없이 암편에서 제외하였다. 이 같은 기준에 따라 SNU-T079, SNU-T080, SNU-T081 박편에서 총 18개의 암편을 기질부와 구분하였다 (Fig. 3.1, Table 4.1).

본 연구에서는 기질부에서 구분한 18개 암편을 조직에 따라 분류하였다. 그 이유는 선행 연구에서 제시한 방법인 조직에 따른 분류와 성인에 따른 분류 중 후자의 경우는 암편의 암석학적 특징 및 광물 화학 조성만으로 분류하기에는 명확하지 않기 때문이다. 예를 들어, 집적 유크라이트 중 Y-791195는 중립질이나 조립질의 결정들로 구성되어 등립상 조직 등의 전형적인 집적 유크라이트의 조직을 나타내고, 구성 광물인 피저나이트(pigeonite)의 #Mg는 42.4로 일반적인 현무암질 유크라이트의 조성에 해당한다 (Mittlefehldt and Lindstrom, 1993). 따라서 Y-791195와 유사한 암석에서 기원한 암편은 조직 및 광물 화학 조성만으로는 그 성인을 명확하게 알 수 없다. 또한, 모노믹트 유크라이트 Millbillillie (Yamaguchi *et al.*, 1994) 의 MM-기질부(MM-matrix)와 비각력암질 유크라이트 ALH A81001(Mayne *et al.*, 2009)은 골격 구조(skeletal texture)의 휘석과 사장석이 구과상 조직(variolitic texture)을 이루어 서로 유사한 조직을 나타낸다. 하지만 각각의 기원은 충격 용융 액(impact melt)과 화성 작용으로 달라 조직만으로 성인을 명확하게 구분하기 어렵다. 본 연구에서는 폴리믹트



유크라이트인 TIL 07014의 다양한 암편을 구분하고 그룹화하는 것이 주요 연구 목적이므로 기준이 명확한 조직을 바탕으로 분류하였다.

본 연구에서 기질부와 구분한 18개 암편을 조직에 따라 분류하면 암편들 대부분은 구과상 암편(variolitic clast), 준오피틱 암편(subophitic clast), 입간 조직 암편(intergranular clast), 각력암질 암편(breccia clast) 입상 변정질 암편(granoblastic clast) 등에 해당한다 (Table 4.1). 암편 중 일부는 특이 암편으로 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편(pyroxene lath clast), 철 니켈 금속 철 함유 암편(Fe-Ni metal bearing clast)이 있다. 조직, 광물 크기, 암편의 구성 광물 비, 재결정 조직 등에 따라 입상 변정질 암편은 세립질 입상 변정질 암편(fine-grained granoblastic clast)과 중립질 입상 변정질 암편(medium-grained granoblastic clast)으로, 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편은 주상형 휘석으로 구성된 암편(lath-shaped pyroxene clast)과 침상형 휘석으로 구성된 암편(acicular-shaped pyroxene clast)으로 세분하였다. 따라서 최종적으로 기질부와 구분한 18개의 암편은 세부 그룹까지 포함하여 총 9개의 종류의 암편들로 구분된다 (Table 4.1~4.2).

#### 4.1.1 구과상 암편(variolitic clast)

18 개 암편 중 2 개의 암편(T079-C7, T080-C1)이 구과상 암편에 해당한다 (Fig. 4.1~4.2). 두 암편은 주구성광물인 사장석(plagioclase), 휘석(pyroxene)과 부구성광물인 크롬 철석(chromite), 티탄 철석(ilmenite), 트로일라이트(troilite) 등으로 구성되며, 사장석과 휘석 결정들은  $100\ \mu\text{m}$  내외로 산출된다 (Fig. 4.1A~B, Fig. 4.2). 구과상 암편 중 T080-C1 암편에서는 주구성 광물로 실리카 동질이상체(silica)가  $100\ \mu\text{m}$  내외로 사장석과 휘석 사이에서 간극 조직을 이루며 산출된다 (Fig. 4.2B~D). T080-C1 암편에서는 침상형의 휘석과 사장석으로 이루어진 조면상 조직(trachyte texture)의 영역이 암편 대부분을 차지하고,  $80\ \mu\text{m}$ ~ $200\ \mu\text{m}$ 의 자형의 휘석 결정들을 둘러 싸고 있다 (Fig. 4.2B~D).



두 암편은 열 변성 작용을 받아 암편의 세립질 결정에서는 다각형 조직(polygonal texture)이 관찰되나 T080-C1 암편의 자형의 휘석 결정은 잔류 Ca-Mg 누대구조(remnant Ca-Mg zoning)를 나타낸다 (Fig. 4.2D, e.g. Yamaguchi *et al.*, 1996). 구과상 암편에서 충격 변성 작용을 지시하는 클라우딩 조직(clouding texture), 판상 깨짐(planar fracture)등이 뚜렷이 관찰되지 않아 구과상 조직의 암편의 충격 변성 작용은 Stöffler *et al.* (1991)이 제시한 충격 변성 작용 기준 중 S2 이하에 해당한다.

#### 4.1.2 준오피틱 암편(subophitic)

18 개 암편 중 2 개의 암편(T079-C2, T080-C3)이 준오피틱 암편에 해당하며, 주구성 광물로는 휘석, 사장석, 실리카 동질이상체, 부구성 광물로는 티탄 철석, 트로일라이트 등으로 구성되어 있다 (Fig. 4.4). 주구성 광물은 500  $\mu\text{m}$  크기를 이루며 주상형으로 산출되는 사장석 결정 내부에는 포획물이 거의 없다 (Fig. 4.4B-C, Fig. 4.5A). 휘석 결정에서는 실리카 동질이상체와 사장석이 연정 조직(intergrowth texture)을 이루는 10  $\mu\text{m}$ ~30  $\mu\text{m}$  크기의 포획체가 관찰된다 (Fig. 4.4B).

열 변성 작용을 지시하는 용리 조직이 휘석에서 나타나며, 용리 엽리의 두께는 약 3  $\mu\text{m}$  내외 이다 (Fig. 4.4B, Fig. 4.4D). 충격 변성 작용으로 사장석에서 미약한 파동 소광(undulatory extinction)과 판상 깨짐(planar fracture)이 관찰되고 휘석 결정에서 용리 엽리가 변형된 킹크 조직(kinked texture)이 관찰된다 (Fig.4.4B, Fig. 4.5). 실리카 동질이상체에서는 2 방향의 평면 변형 구조(planar deformation features; PDFs)등이 관찰된다 (Fig. 4.5). 암편의 충격 변성 작용의 특징들은 Stöffler *et al.* (1991)이 제시한 충격 변성 작용 기준 중 S3~S4 에 해당한다.

#### 4.1.3 입간 조직 암편(intergranular clast)

18 개의 암편 중 4 개의 암편(T079-C1, T079-C3, T080-C5, T081-C7)이 입간 조직 암편에 해당되며, 주구성 광물은 사장석, 휘석, 실리카 동질이상체이고 부구성 광물은 트로일라이트, 크롬 철석, 티탄 철석이다 (Fig. 4.6~4.8). 사장석은 작은 크기의 휘석 결정에 다량으로 포획하고, 휘석은 실리카 동질이상체와 사장석이 연정 조직을 이루는 포획체를 포함한다 (Fig. 4.7). T079-C3 암편은 다른 암편과 달리 크롬 철석-트로일라이트-사장석으로 이루어진 포획체를 포함한다 (Fig. 4.7B). 실리카 동질이상체는 트로일라이트 및 사장석과 인접하여 산출되고 T081-C7 암편(각력암질 암편 내 암석 파편)을 제외하면 다른 암편에 비해서 많은 양(> 11 vol.%)이 나타난다 (Table 4.3, Fig. 4.7C).

휘석에서는 열 변성 작용으로 인해 용리 엽리가  $1\mu\text{m}$ ~ $10\mu\text{m}$  두께로 관찰된다 (Fig. 4.7). 암편이 받은 충격 작용으로 인해 사장석에서 불규칙 깨짐(irregular fracture), 관상 깨짐(planar fracture), 변형된 외형 및 쌍정, 충격 용융 맥, 미세 단층 등이 관찰된다 (Fig. 4.7A~B, Fig. 4.7D, Fig. 4.8A~C). 실리카 동질이상체에서도 충격 변성 작용을 지시하는 평면 변형 구조(planar deformation features)가 2~3 방향으로 나타난다 (Fig. 4.8A, Fig. 4.8D~F). 입간 조직 암편에서 관찰된 충격 변성 조직은 Stöffler *et al.* (1991)이 충격 변성 제시한 기준에서 S4~S5에 해당한다.

#### 4.1.4 입상 변정질 암편(granoblastic clast)

18 개의 암편 중 4 개의 암편(T080-C4, T080-C6, T080-C7, T081-C2)이 입상 변정질 암편이다 (Fig. 4.9~4.14). 입상 변정질 암편은 주구성 광물인 사장석, 휘석, 실리카 동질이상체와 부구성 광물인 트로일라이트, 크롬 철석, 티탄 철석으로 구성되며, 재결정 작용에 의한 다각형 조직(polygonal texture) 및 불합상 경계(serrated grain boundary) 등을 보여준다 (Fig. 4.9~4.10, Fig. 4.12~13).

입상 변정질 암편은 구성 광물의 결정 크기에 따라 T080-C4 암편은 세립질 입상 변정질 암편( $<300\mu\text{m}$ )으로, 그 외 3개 암편은 중립질 입상 변정질 암편( $\geq 300\mu\text{m}$ )으로 세분된다 (Fig. 4.9~4.14). 중립질 입상 변정질 암편의 휘석에서 열 변성 작용을 지시하는 클라우딩 조직과 용리 조직이 발달했다 (Fig. 4.10). 길이는  $10\mu\text{m}$  내외이고 두께는  $0.5\mu\text{m}$  이하인 티탄 철석과  $5\mu\text{m}$  내외 크기의 크롬 철석이 휘석에서 클라우딩 조직을 이룬다 (Fig. 4.10B). 용리 조직에서 엽리의 두께가  $0.5\mu\text{m}\sim 9\mu\text{m}$ 로 넓은 범위를 띄며 대부분은  $5\mu\text{m}$  이상이다 (Fig. 4.10B, Fig. 4.10D, Fig. Fig. 4.10F). T080-C6 암편의 휘석 중 일부에서  $1\mu\text{m}$  이하의 얇은 용리 엽리가 두꺼운 용리 엽리( $>5\mu\text{m}$ )와 한 결정 내에서 함께 나타나고, 두꺼운 용리 엽리와 평행하거나 수직인 방향으로 배열되어 있다 (Fig. 4.10B). 충격 변성 작용으로 사장석 중 일부에서 쌍정이 변형된 특징과 실리카 동질이상체에서 2~3 방향의 판상 변형 구조(planar deformed fractures)가 관찰된다 (Fig. 4.11). 중립질 입상 변정질에서 관찰된 충격 변성 작용의 특징은 Stöffler *et al.* (1991)이 제시한 기준 중 S4에 해당한다.

세립질 입상 변정질 암편은 크기가  $600\mu\text{m}$  이하의 결정들로 구성되고, 그 중 대부분은  $100\mu\text{m}\sim 300\mu\text{m}$  내외이다 (Fig. 4.12~4.13). 다른 암편에서는 Ca 함량이 낮은 휘석에 Ca 함량이 높은 휘석이 엽리로 나타나는 것이 일반적이거나, 세립질 입상 변정질 암편의 휘석 중 일부는 Ca 함량이 높은 휘석이 우세하고 Ca 함량이 낮은 휘석이 엽리로 나타난다 (Fig. 4.13A). Ca 함량이 높은 휘석이 우세한 휘석 결정은 후기 정출 광물인 실리카 동질이상체, 티탄 철석, 트로일라이트 등과 인접하여 산출된다. 암편을 구성하는  $100\mu\text{m}$  내외의 크기의 휘석 결정은 용리 조직이 없거나 용리 엽리의 두께가  $1\mu\text{m}$  미만으로 얇으며,  $200\mu\text{m}$  이상의 큰 결정은 용리 엽리가 넓은 간격( $10\mu\text{m}\sim 20\mu\text{m}$  내외)을 가지며  $3\mu\text{m}$  두께로 나타난다 (Fig. 4.13A). 암편의 세립질 결정에서는 충격 변성 작용을 지시하는 판상 깨짐, 파동소광, 불규칙 깨짐(irregular fracture)등이 관찰되지 않으며 실리카 동질이상체에서도 판상 변형 구조(planar deformation features)이 나타나지 않는다 (Fig. 4.14). 따라서 세립질 입상 변정질

암편 내 충격 변성 조직은 Stöffler *et al.* (1991)이 제시한 충격 변성 작용 기준 중 S1~S2 에 해당한다.

#### 4.1.5 각력암질 암편(breccia clast)

18 개 암편 중 2 개의 암편(T080-C2, T081-C5)이 각력암질 암편이다 (Fig. 4.15~4.17). 각력암질 암편은 세립질의 기질부와 100  $\mu\text{m}$  내외의 각진 모양의 사장석, 휘석의 결정 파편들로 구성되며, T081-C5 암편의 경우 입간 조직을 나타내는 암편(T081-C7)과 철-니켈 금속 철 함량이 높은 암편(T081-C6)도 포함한다. T080-C2 암편의 기질부는 세립질(20  $\mu\text{m}$ ~50  $\mu\text{m}$ )의 휘석, 사장석, 실리카 동질이상체, 티탄 철석, 크롬 철석 등으로 구성되며, T081-C5 암편의 기질부는 휘석, 사장석, 티탄 철석, 크롬 철석으로만 구성된다 (Fig. 4.16). 두 암편의 기질부를 구성하는 휘석과 사장석의 비율은 각각 50 vol.%, 37 vol.%와 61 vol.%, 28 vol.%이다 (Fig. 4.16A~B, Table 4.9).

두 각력암질 암편의 기질부는 입상 변정질 조직 등이 관찰되며, 상대적으로 T081-C5에서 재결정 조직이 뚜렷하다 (Fig.4.16A~B). 두 각력암편을 구성하는 대부분의 휘석은 용리 조직 발달하였으나 T080-C2 암편의 휘석 결정 파편 중 일부에서 결정의 중심부에서 외각부로 갈수록 용리 엽리 사이 간격이 좁아지는 잔류 누대 구조가 관찰된다 (Fig. 4.16C). 두 각력암편을 구성하는 사장석 결정 파편에서 충격 변성 작용을 지시하는 판상 깨짐(planar fracture), 파동 소광(undulatory extinction), 아입자 경계(subgrain texture) 등이 관찰되었다 (Fig. 4.15, Fig. 4.17). 이러한 조직은 Stöffler *et al.* (1991)이 제시한 충격 변성 정도의 기준에서 S3에 해당한다. T081-C5 암편 내 암석 파편(T081-C6, T081-C7)의 사장석 결정에서 충격 변성 작용을 지시하는 균열(fracture)등이 미약하다 (Fig. 4.23). 따라서 T081-C5 암편은 광물 파편, 암석 파편들이 혼재 및 고화 된 이후에는 Stöffler *et al.* (1991)이 제시한 충격 변성 기준 중 S2 이하에 해당하는 충격 작용만 받았을 것이다.

#### 4.1.6 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편(pyroxene lath clast)

18개 암편 중에서 3개의 암편(T081-C1, T081-C3, T081-C4)이 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편에 해당한다 (Fig. 4.18~4.20). 막대 모양 휘석으로 구성된 암편은 사장석과 휘석으로 서로 분리되어 층을 이루며 실리카 동질이상체는 포함하지 않는다 (Fig. 4.18). 휘석에서는 용리 엽리가 관찰되지 않고 Ca 함량이 낮은 휘석은 주상형 또는 침상형으로 산출된다 (Fig. 4.18, Fig. 4.19A, Fig. 4.19E). Ca 함량이 낮은 휘석 결정들은 Ca 함량이 높은 휘석 결정을 관통하거나 부분적으로 포획된 조직을 이룬다. 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편(pyroxene lath clast)과 유사한 암편이 van Drongelen *et al.* (2016)에서 보고되었다.

세 암편 중 T081-C1 암편 내 Ca 함량이 낮은 휘석은 주상형으로 산출되며 Ca 함량이 높은 휘석 중 일부에서 용리 엽리가 관찰된다 (Fig. 4.19 A~B). 사장석 결정 중 일부는 충격 작용으로 파쇄되어 사장석 결정들의 크기가  $700\mu\text{m}$  이상인 결정과  $100\mu\text{m}$  이하인 결정들로 나타나 이분법적인 크기 분포를 보인다 (Fig. 4.20A). 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편은 Ca 함량이 낮은 휘석이 주상형으로 나타나는 암편(T081-C1)과 침상형으로 나타나는 암편(T081-C3, T081-C4)으로 세분된다. T081-C1 암편에서는 사장석의 일부는 충격 작용 유리질화되어 마스크리나이트(maskelynite)로 나타나며, 다른 파쇄된 사장석 결정 중 일부는 재결정 조직을 나타낸다 (Fig. 4.18E~F, Fig. 4.19C, Fig. 4.20B). 이러한 충격 변성 작용을 지시하는 조직들은 Stöffler *et al.* (1991)이 제시한 충격 변성 기준에서 S4~S5에 해당한다.

T081-C3, T081-C4 암편에서 Ca 함량이 낮은 휘석은 주로 침상형으로 산출되고 Ca 함량이 높은 휘석에서 용리 엽리를 관찰할 수 없다 (Fig. 4.19E~F). T081-C1 암편과 달리 파쇄된 사장석에서 재결정 조직이 관찰되지 않는다 (Fig. 4.19D). 충격 작용 때문에 T081-C4 암편 전체를 관통하는 미세 단층과 사장석 결정이 간섭색이 약해진 특징이 나타나며 T081-C3 암편에서는 충격 용융 맥(impact melt vein)도 관찰된다 (Fig. 4.20B-D). 침상형의 휘석으로 구성된 암편(T081-C3, T081-C4)에서 충격 변성 작용을

지시하는 특징들은 Stöffler *et al.* (1991)이 제시한 충격 변성 기준 중 S4에 해당한다.

TIL 07014의 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편은 van Drongelen *et al.* (2016)에서 보고한 NWA 5232의 “pyroxene lath” 암편과 유사하나 사장석이 휘석과 혼재되지 않고 층을 이루며 분리되는 점, Ca 함량이 낮은 휘석 결정이 주상형 외에도 침상형으로도 산출되는 점이 다르다 (Fig. 4.18, Fig. 4.19A, Fig. 4.19E). 또한 TIL 07014의 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편에서  $5\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$  크기의 감람석들이 파쇄된 사장석의 결정 경계를 따라 나타나고 Ca-인회석이 암편 내에서 맥상으로 산출되는 점도 NWA 5232와 구분된다 (Fig. 4.19D, Fig. 4.18F, Fig. 4.19F).

#### 4.1.7 철-니켈 금속 철 함유 암편(Fe-Ni metal bearing clast)

18 개 암편 중에서 T081-C6 암편은 주구성 광물로 사장석과 휘석으로 구성되며 부구성광물로 철-니켈 금속 철, 크롬 철석, 티탄 철석, 트로일라이트를 포함한다(Fig. 4.21~4.23). 철-니켈 금속 철 함유 암편은 각력암질 암편인 T081-C5 내부에서 관찰된 암석 파편으로  $100\mu\text{m}\sim 200\mu\text{m}$ 의 크기의 사장석과 휘석이 간극 조직을 이루어 T081-C5와 구분된다. 부구성 광물 중 철-니켈 금속 철 함량이 5 vol.% 이상으로 높은 것이 특징이다 (Table 4.9, Fig. 4.21, Fig. 4.22A~C).

암편을 구성하는 휘석 결정 내 용리 조직(exsolution texture) 발달이 미약하고, 휘석의 용리 엽리(exsolution lamellae)의 대부분이  $1\mu\text{m}$  내외인 두께로 나타난다 (Fig. 4.21B, Fig. 4.22C~D, Fig. 4.24). 용리 조직의 발달이 미약한 특징들은 해당 암편이 낮은 수준의 열 변성 작용을 경험하였음을 지시한다 (Takeda and Graham., 1991). 암편을 구성하는 사장석과 휘석 결정에서 균열(fracture)이 거의 관찰되지 않으며, 이는 Stöffler *et al.* (1991)이 제시한 기준 충격 변성 작용의 기준 중 S1 이하에 해당한다 (Fig. 4.23).

철-니켈 금속 철 주변에서는 염소(chlorine)와 불소(fluorine)를 포함하는 철 산화물(Fe-oxide)이 관찰된다 (Fig. 4.22C, Fig 4.23A). 사장석과 인접한 영역에서는 철 산화물은 사장석 내 틈을 따라서 침투하는 양상을 보인다. 이러한 철 산화물은 운석이 지구에 낙하한 이후 풍화 작용을 받은 결과물이다 (Lee *et al.*, 2004).

철-니켈 금속 철 함유 암편처럼 다량의 금속 철을 포함하고 있는 암편은 모노믹트 유크라이트(Camel Donga, North West Africa 5218, North West Africa 4269) 및 폴리믹트 유크라이트(North West Africa 2268, North West Africa 3368, Dar al Gani 872) 등에서 여러 번 보고되었다 (e.g. Gardner-Vandy *et al.*, 2011; Moine *et al.*, 2006; Palme *et al.*, 1988; Patzer *et al.*, 2003; Seddiki *et al.*, 2013; Warren *et al.*, 2017; Wittmann *et al.*, 2011).

**Table 4.1.** Classification of clasts in TIL 07014 based on their textures.

Type	Subtype	Textures	Clasts
Variolitic		Fine-grained(<200 $\mu\text{m}$ ), acicular, and dendritic shape plagioclase,	T079-C7, T080-C1
Subophitic		Medium-grained(100 $\mu\text{m}$ ~2500 $\mu\text{m}$ ), and lath-shaped plagioclases are enclosed by subhedral or anhedral pyroxene	T079-C2, T080-C3
Intergranular		Medium-grained(60 $\mu\text{m}$ ~1100 $\mu\text{m}$ ), and anhedral pyroxenes are occurred between euhedral plagioclase	T079-C1, T079-C3, T080-C5, T081-C7
Granoblastic	Medium	Medium-grained(200 $\mu\text{m}$ ~700 $\mu\text{m}$ ), 120° triple junction, and serrated grain boundaries	T080-C6, T080-C7, T081-C2
	Fine	Fine-grained(20 $\mu\text{m}$ ~500 $\mu\text{m}$ ), high abundance of silica and high-Ca pyroxene host pyroxenes.	T080-C4
Breccia		Angular shape mineral and rock fragments, fine-grained matrix	T080-C2, T081-C5
Pyroxene lath	Lath-shaped	No exsolution texture, lath- shaped low-Ca pyroxene and recrystallized plagioclase	T081-C1
	Acicular-shaped	No exsolution texture and recrystallized texture, acicular-shaped low-Ca pyroxenes	T081-C3, T081-C6
Fe-Ni metal bearing		Ni containing Fe-Ni metal	T081-C7



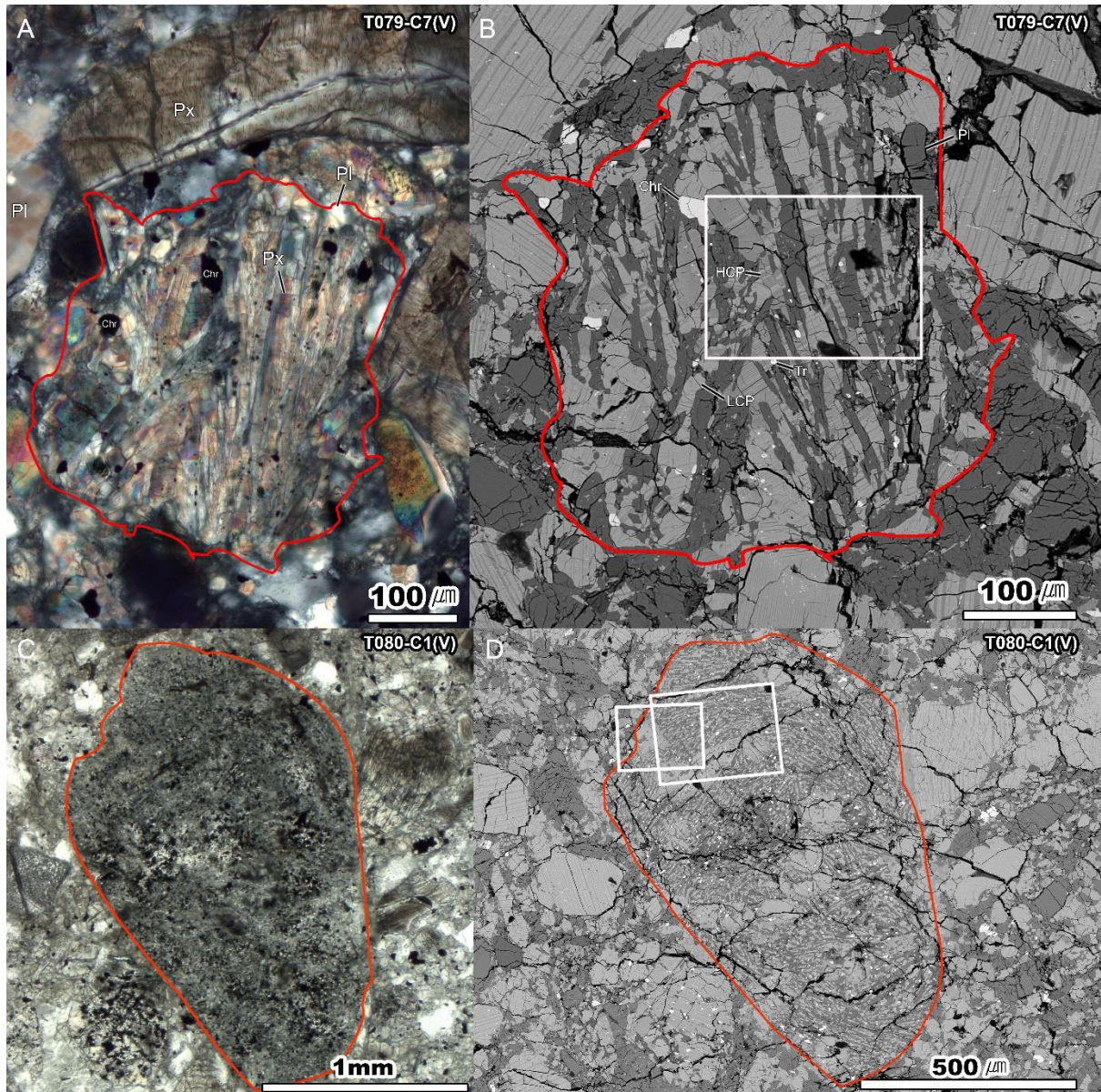
**Table 4.2.** Summary of grain size, modal analysis, thermal and shock metamorphic degree of each type of clasts.

Modal abundance (vol.%)/sizes(μm)									Thermal metamorphism		Shock metamorphism
Clast type	Clast Subtype	Clast size (mm)	High Ca Pyroxene	Low Ca Pyroxene	Plagioclase	Silica	Accessory mineral	Accessory mineral*	An	Type	Stage
Variolitic		0.3~1.3	23~24	24~30	41~45	trace~9	1~3		75.3~84.5 (T079-C7)	5(T079-C7)	
			exsolution**	5~200	5~200	5~150	10~50	Chr, Il	81.0~91.6 (T080-C1)	4 (remnant Ca-zoning)	S1~S2
Subophitic		0.8~1.3	16~23	29~46	25~44	trace~10	trace~5				
			exsolution	100~2300	100~2300	70~2500	50~450	Chr, Tr	85.9~92.1	5	S3~S4
Intergranular		0.8~9.4	6~25	13~36	30~47	trace~49	trace~3				
			exsolution	60~1500	60~1500	100~1100	160~1100	Chr,Il, Tr	81.8~90.0	5	S4~S5
Granoblastic	Fine	1.0~2.0	26	23	34	14	5				
			20~60	20~60	20~100	40~500	80~200	Chr, Il, Tr	81.4~88.2	5	S1~S2
	Medium	0.7~2.7	15~23	22~41	13~54	9~28	1~3				
			exsolution	200~600	200~600	300~500	250~700	Chr, Il, Tr	86.4~90.6	5	S4
Breccia		1.0~6.0	14~30	34~57	28~37	trace~11	trace~2		81.5~87.1 (T080-C2)	4 (remnant Ca-zoning)	
			exsolution	20~200	20~250	20~70	<10		87.5~92.0 (T081-C5)	5	S1~S2***

\*Chr : chromite, Il : ilmenite, Tr : troilite, Ca-P : Ca-phosphate. \*\* Due to no HCP host grain, grain size cannot be measured. \*\*\* The shock stage of impact which occurs after lithification of mineral debris and matrix.

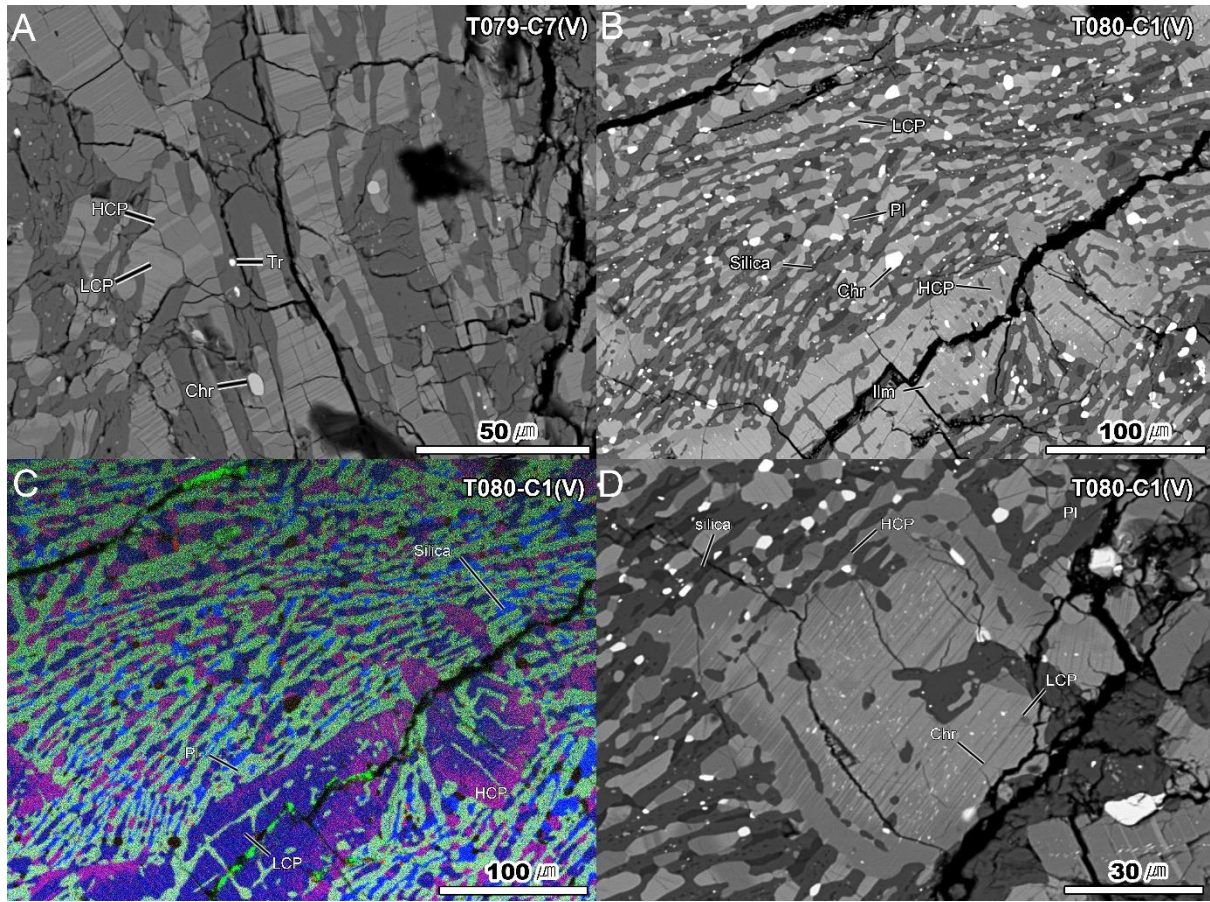
**Table 4.2.** Summary of grain size, modal analysis, thermal and shock metamorphic degree of each type of clasts (continued).

Clast type	Clast Subtype	Clast size (mm)	Modal abundance (vol.%)/sizes( $\mu\text{m}$ )						Thermal metamorphism		Shock metamorphism
			High Ca Pyroxene	Low Ca Pyroxene	Plagioclase	Silica	Accessory mineral	Accessory mineral*	An	Type	Stage
Pyroxene lath	Lath-shaped	1.2~2.8	1~13	13~41	43~84	-	trace				
			<80	<100	40~800	-	50~200	Chr, Ca-P	90.8~93.1	5	S4~S5
	Acicular - shaped	1.5~8.2	13 50~200	41 30~300	43 10~500	- -	3 5~20	Chr, Tr Ca-P, Ol	87.6~95.1	?	S4
Fe-Ni metal bearing		0.9	10 exsolution	46 20~100	37 100~200	- -	6 5~70	Fe-Ni metal, Chr, Tr, Il	88.1~91.1	5	S1~S2



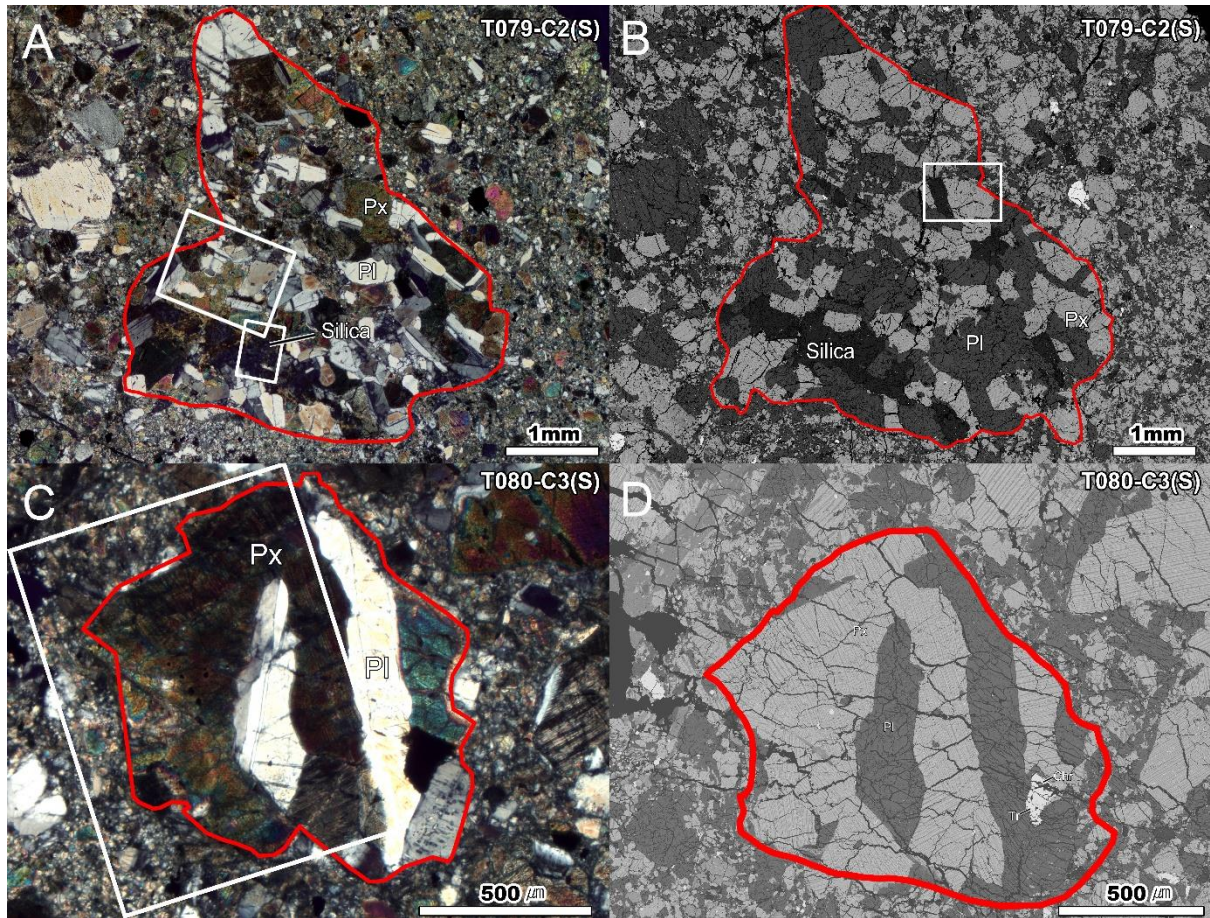
**Figure 4.1.** Images of variolitic type clasts: (A and B) for T079-C7 and (C and D) for T080-C1. (A) ix XPL image, and (B and D) BSE images. (C) is transmitted-plane-polarized light (PPL) image. (A and B) T079-C7 clast is mainly composed by fine-grained(<200 $\mu\text{m}$ ) pyroxenes and plagioclases that shows variolitic texture. (C and D) T080-C2 clast consist of fine-grained(<100 $\mu\text{m}$ ) pyroxene and plagioclase grains. Due to the grain sizes, the clast is distinguished from matrix of T080 section. The red line shows the boundary of the clast. High magnification images of a box in (B) and two boxes in (D) are shown in Figure 4.2 (A) and Figure 4.2 (B), (D), respectively. Pl=plagioclase, Px=pyroxene, HCP=High-Ca pyroxene, LCP=Low-Ca pyroxene, Chr=chromite.





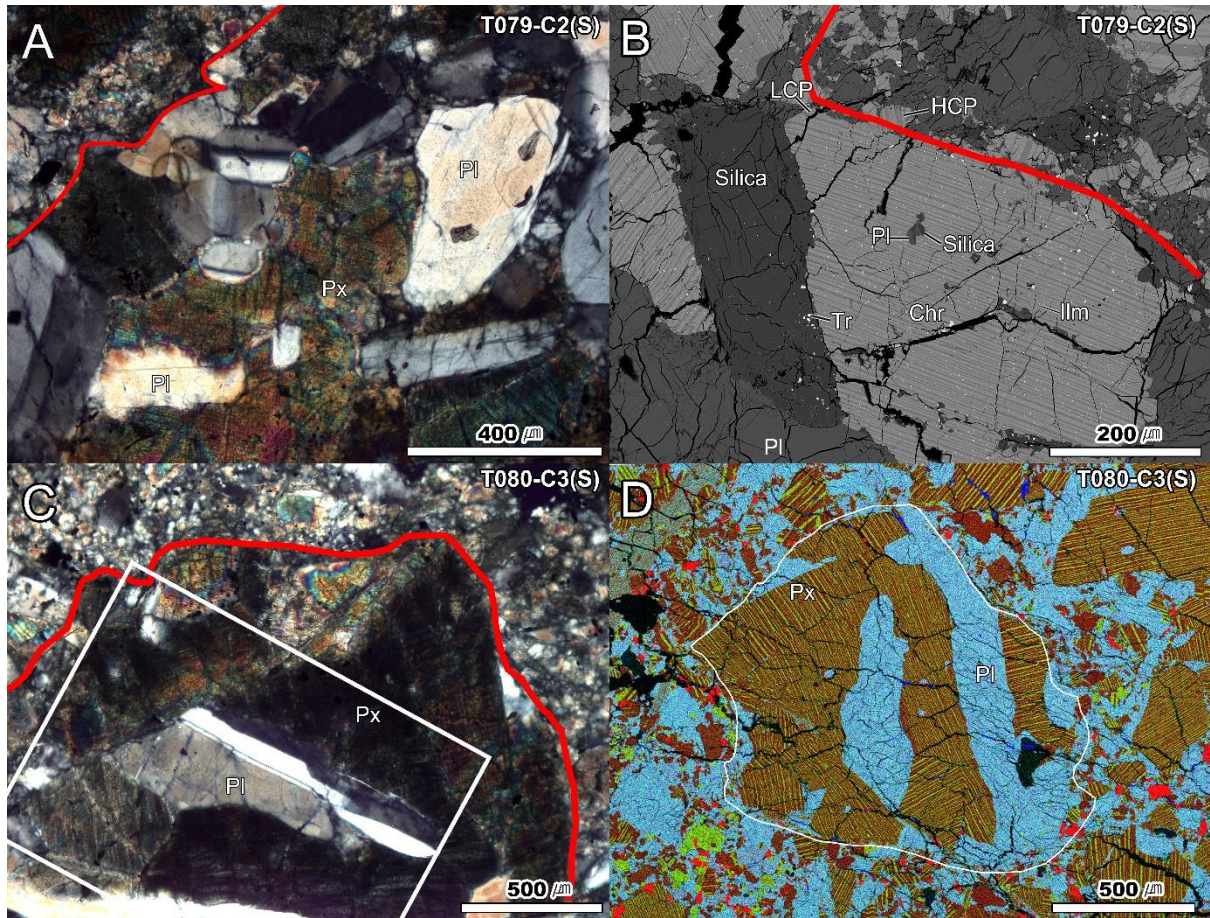
**Figure 4.2.** Images of detail textures of variolitic type clasts: (A) for T079-C2, (B-D) for T080-C2. (A, B, and D) are BSE images, and (C) is X-ray element map image (red: Ca, green: Al, blue: Si). (A) Fine-grained plagioclases are dendritic or acicular, and pyroxenes show interstitial texture. (B and C) Fine-grained plagioclase and pyroxene form trachytic texture, and large pyroxenes in the clast have remnant-Ca zoning. (D) High-Ca pyroxene exsolution lamellae in T080-C1 clast becomes thicker and denser from core to rim and finally forms high-Ca pyroxene rim. HCP=high-Ca pyroxene, LCP=low-Ca pyroxene, Pl= plagioclase, Silica=silica polymorph, Tr=troilite, Chr=chromite, Ilm=ilmenite.



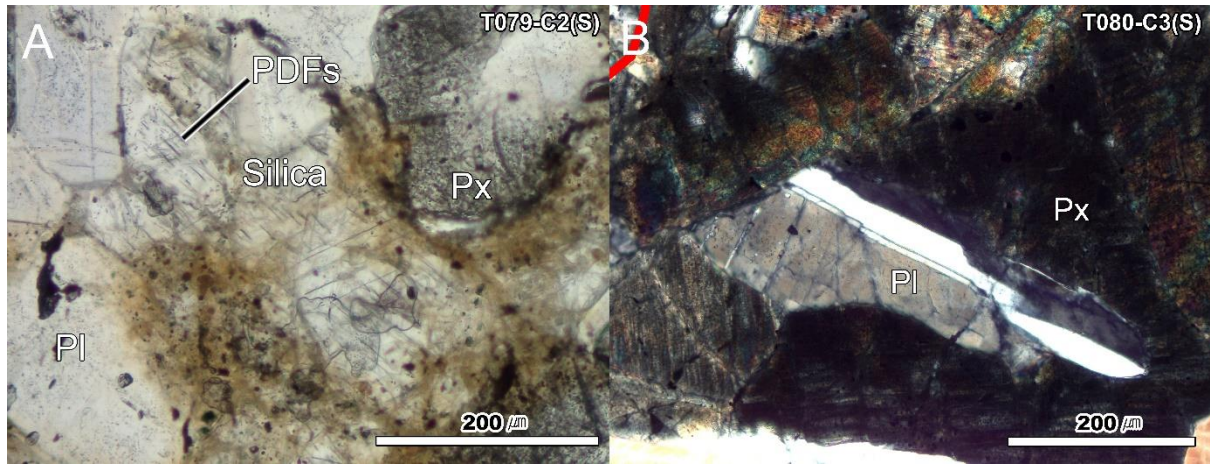


**Figure 4.3.** Images of subophitic type clasts: (A and B) for T079-C2 and (C and D) for T080-C3. (A and C) are XPL images, and (B and D) are BSE images. Subophitic type clasts are mainly composed by plagioclase lath and subhedral or anhedral pyroxene. Pyroxene partially envelops plagioclase grains. The red line shows the boundary of the clast. High magnification images of boxes in (A), (B), and (C) are shown in Figure 4.4 (A), Figure 4.5 (A), and Figure 4.4 (B), and Figure 4.4 (C) respectively. Mineral abbreviations are used from that of Figure 4.2. Px=pyroxene.



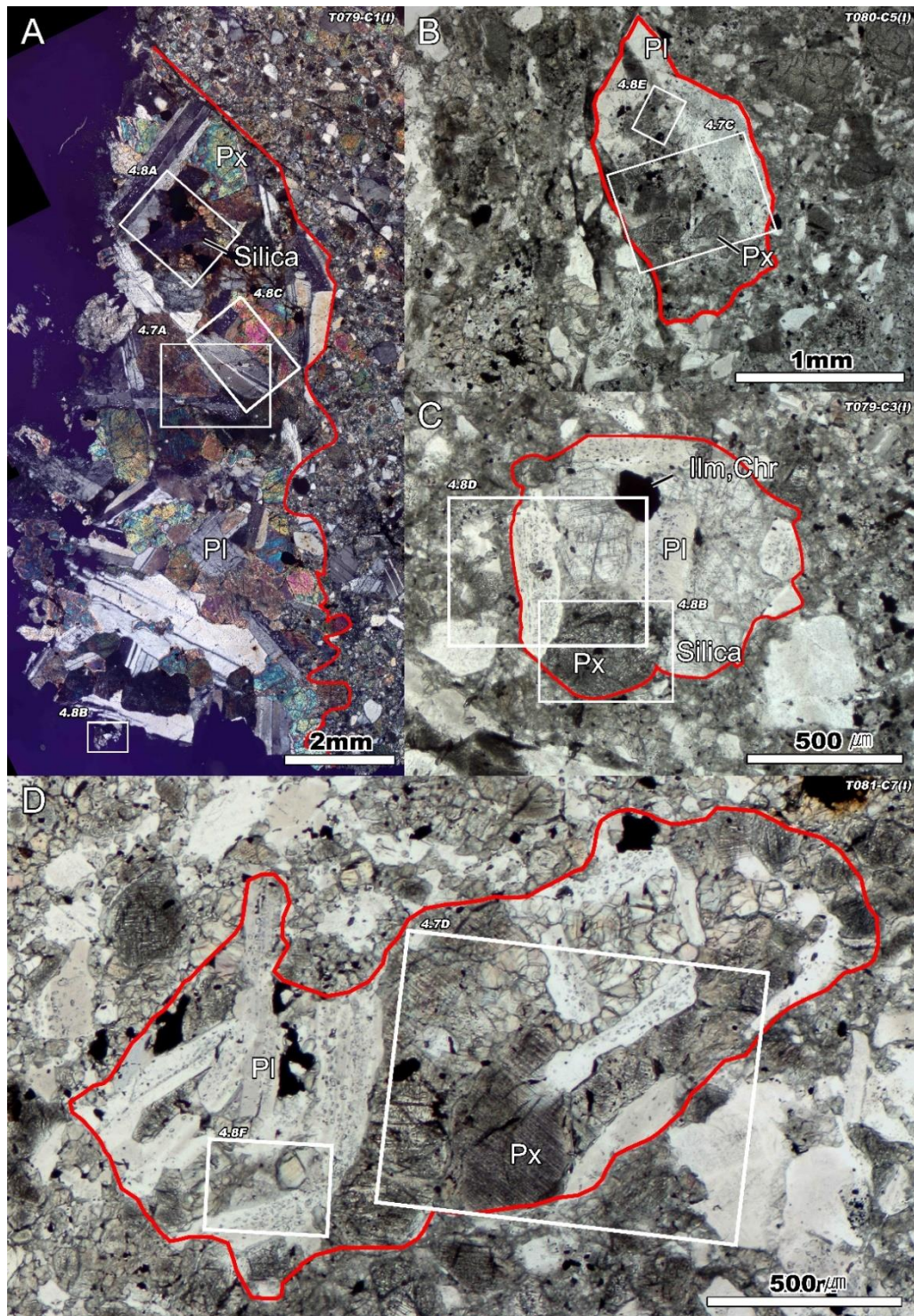


**Figure 4.4.** Images of detail textures and thermal metamorphic characteristics in subophitic type clasts: (A and B) for T079-C2, (C and D) for T080-C3. (A and C) are XPL images. (B) is BSE image and (D) is X-ray element map image (red: Ca, green: Si, blue: Al). (A) Plagioclase lath are partially surrounded by pyroxene. (B) Pyroxene has exsolution texture, clouding texture and silica-plagioclase assemblage inclusions. Some exsolution lamellas are disconnected with kinked texture (right-hand side). (C and D) Enclosing a plagioclase lath, pyroxenes exhibit exsolution texture. The red or white line shows the boundary of the clast. High magnification images of a box in (C) is shown in Figure 4.5 (B). Mineral abbreviations are used from that of Figure 4.2. Px=pyroxene.



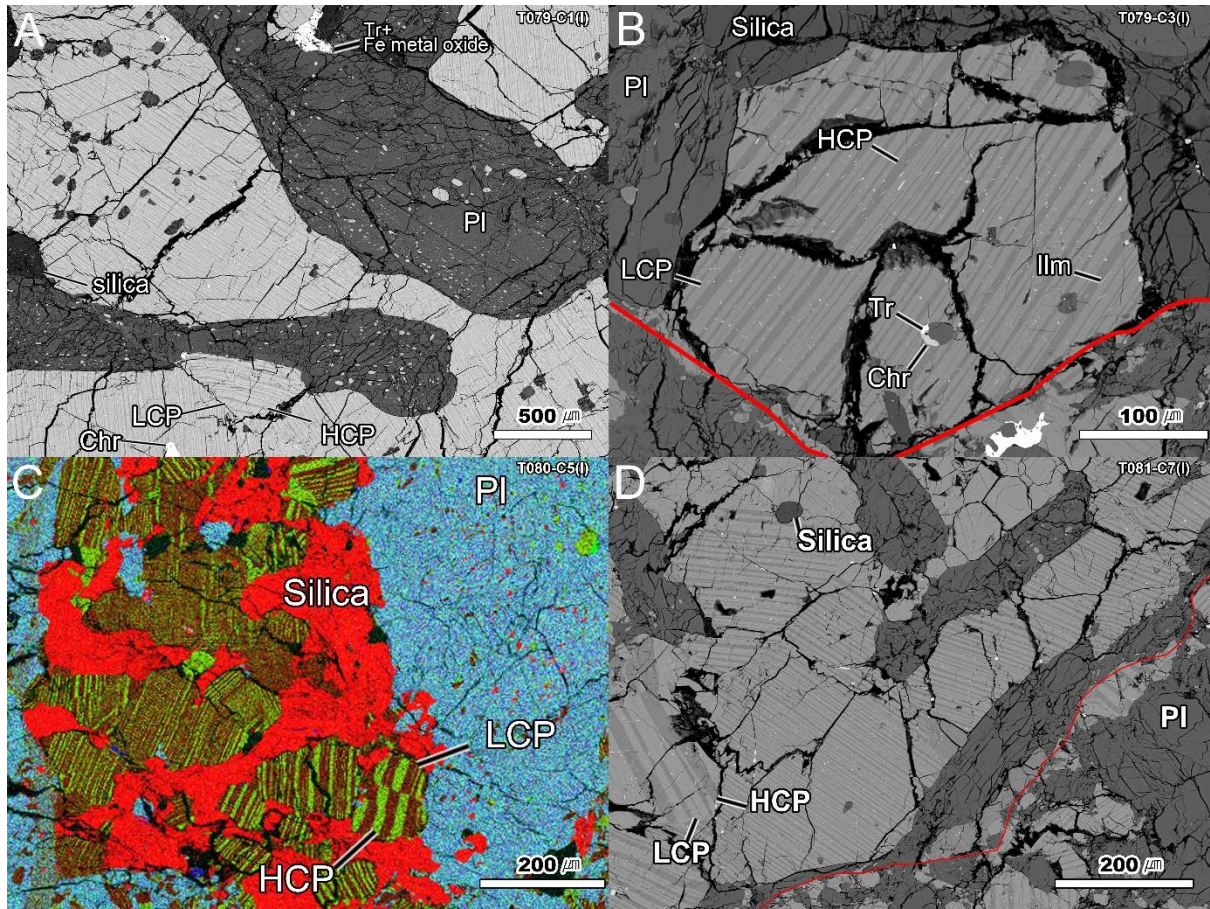
**Figure 4.5.** Images of shock metamorphic textures in subophitic type clast: (A) for T079-C2, and (B) for T080-C2. (A) is PPL image, and (B) is XPL image. (A) Silica in T079-C2 clast has planar deformation features(PDFs) which are oriented to two directions. (B) Plagioclase in T080-C3 clast shows undulatory extinction and deformed twins. (B). The red line shows the boundary of the clast. Mineral abbreviations are used from abbreviation that of Figure 4.2. Px=pyroxene, PDFs=planar deformation features.





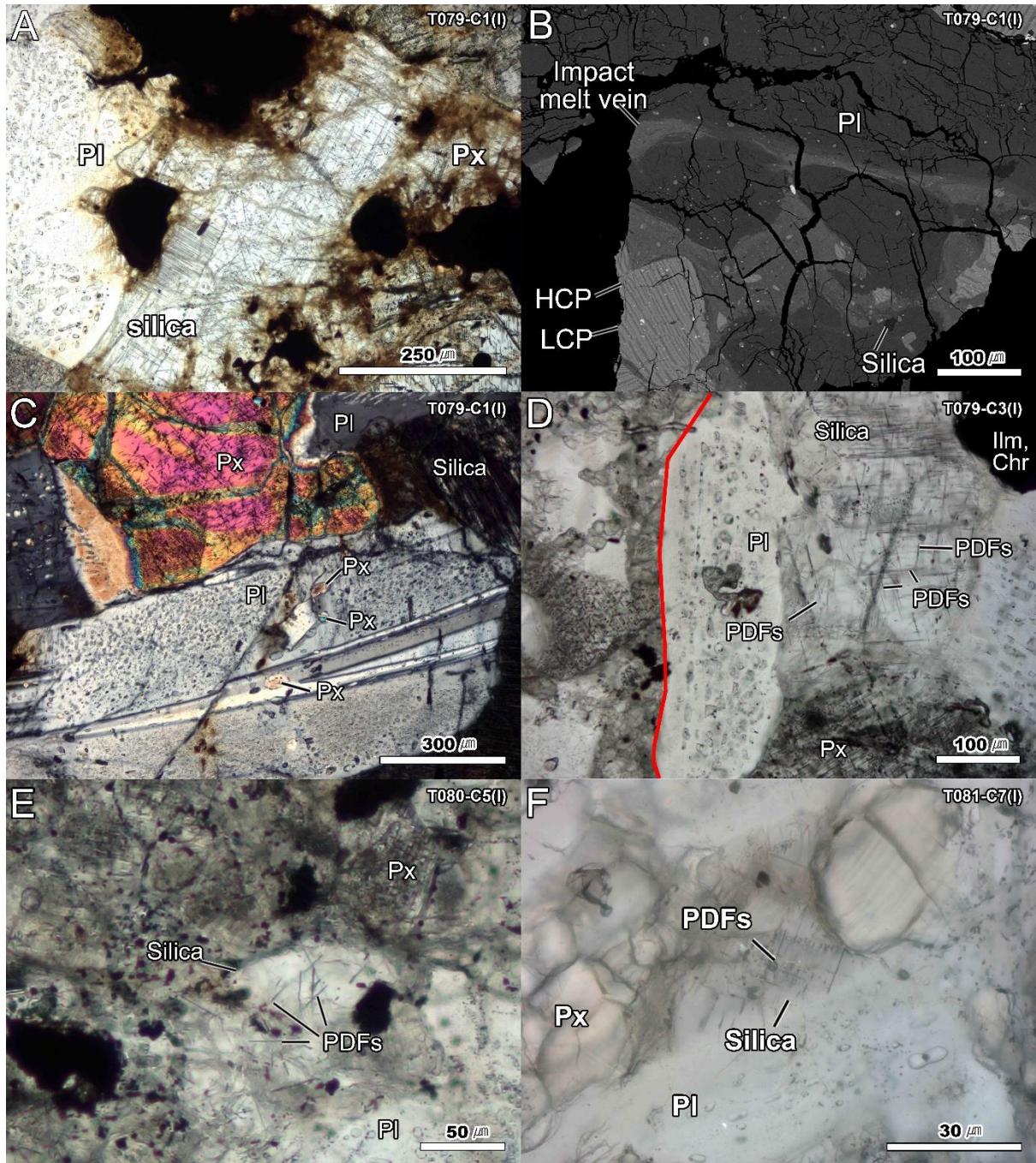
**Figure 4.6.** Images of intergranular type clasts. (A), (B), (C), and (D) for T079-C1, T080-C5, T079-C3, and T081-C7, respectively. (A) is XPL image, and (B-D) are PPL images. Intergranular type clasts are composed by plagioclase lath and euhedral or subhedral pyroxene. The pyroxene exhibits interstitial texture between plagioclase laths. High magnification images of boxes in (A)~(D) are shown in the following figures. The numbers of those are presented upper side of the boxes. The red line shows the boundary of the clast. Mineral abbreviations are used from that of Figure 4.2. Px=pyroxene.





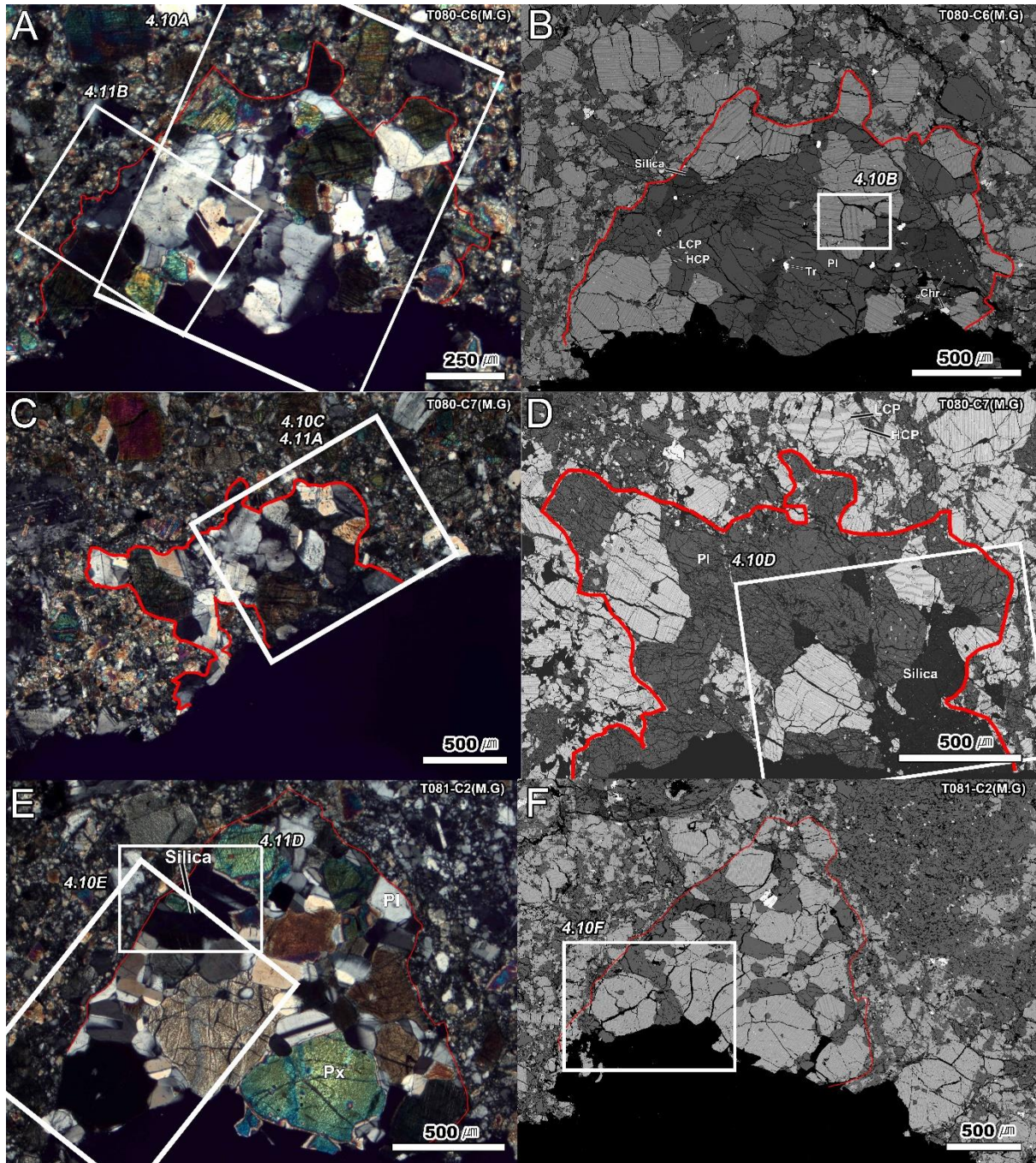
**Figure 4.7** Images of detail textures in intergranular type clast: (A) for T079-C1, (B) for T079-C3, (C) for T080-C5, and (D) for T081-C7. (A, B, and D) are BSE images, and (C) is X-ray element map image (red: Si, green: Ca, blue: Al). (A) Plagioclase in T079-C1 has abundant pyroxene inclusions, and show irregular or planar fractures. Pyroxene has exsolution texture and silica-plagioclase assemblage inclusions. (B) Pyroxene in T079-C3 shows exsolution and clouding texture, and chromite-troilite-plagioclase assemblage inclusions. The red line shows the boundary of the clast. Mineral abbreviations are used from that of Figure 4.2.





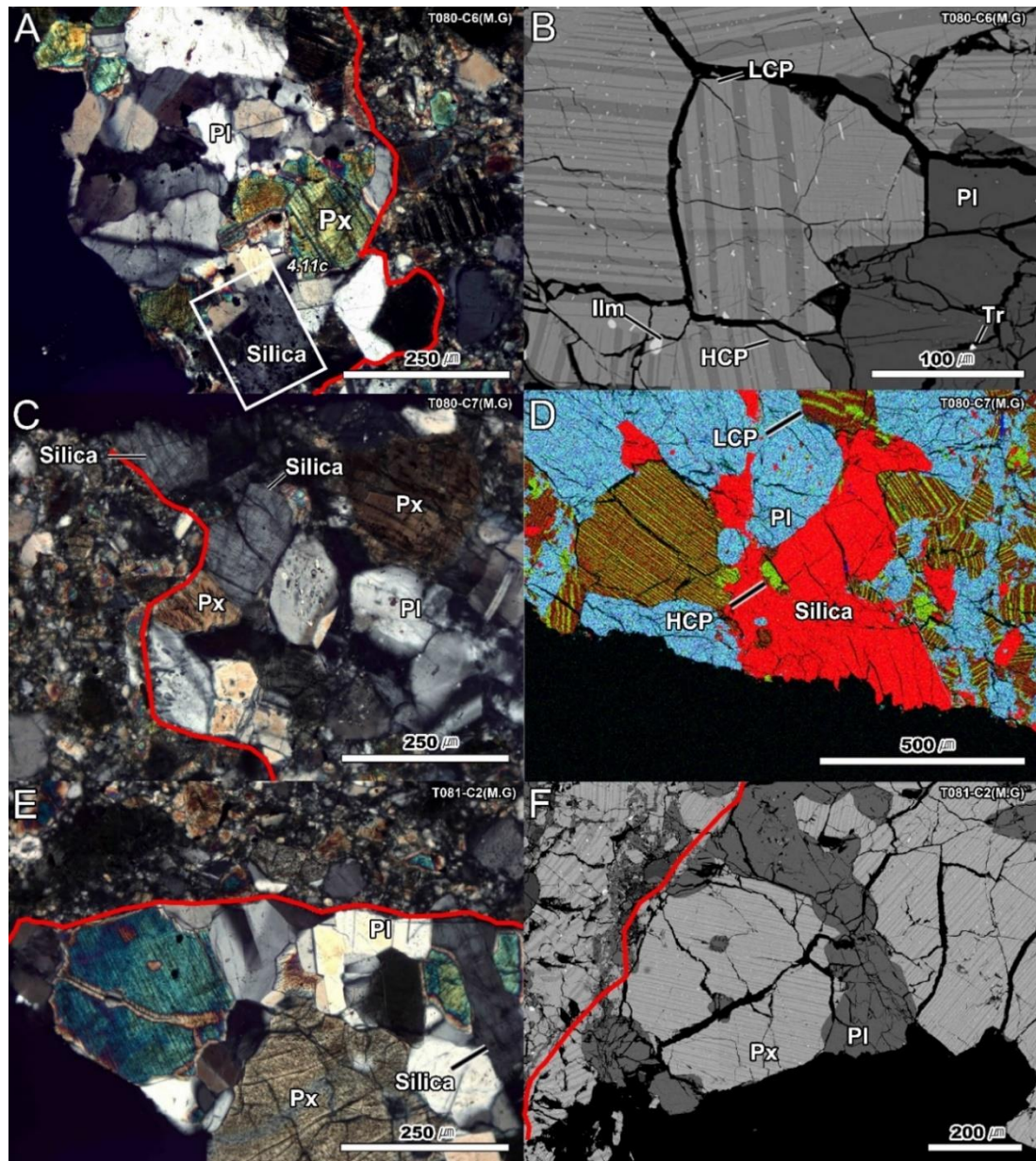
**Figure 4.8.** Images of shock metamorphic textures intergranular type clasts: (A, B and C), (D), (E), and (F) for T079-C1, T079-C3, T080-C5, and T081-C7 respectively. (A, D, E, and F): PPL images, (B) BSE image, (C): XPL image. (A, D, E, and F) PDFs in silica of T079-C1, T079-C3, T080-C5, and T081-C7 are oriented to 3 directions, 2 directions, 2 directions, and 2 directions, respectively. (B) Impact melt vein located at the edge of T079-C1 clast is thick (~300 μm) and contains plagioclase and pyroxene fragments. The fragments in the vein is roundness and show partially molten features. (C) Plagioclase in T079-C1 clast shows deformed twins with micro-fault. The red line shows the boundary of the clast. Mineral abbreviations are used from that of Figure 4.2. PDFs=planar deformation features, Px=pyroxene.



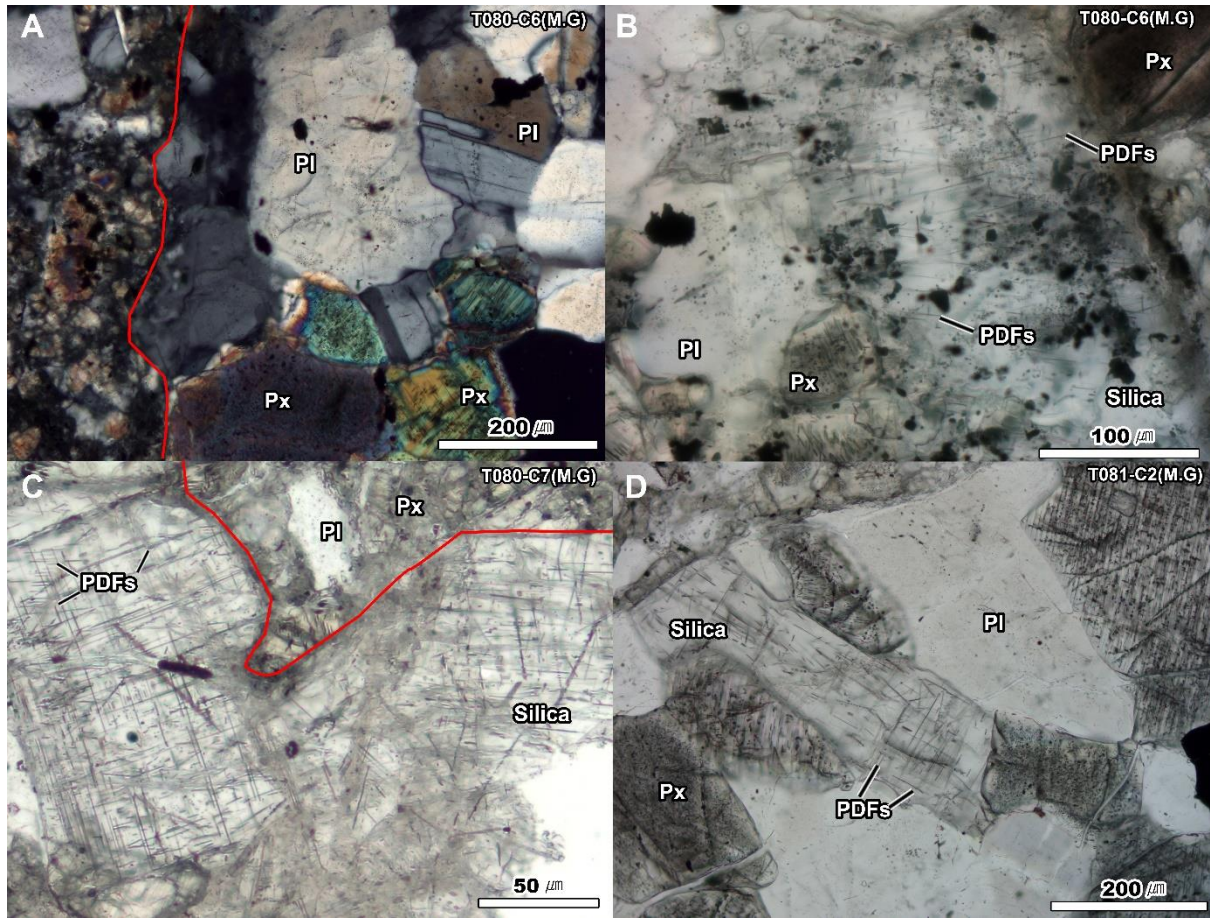


**Figure 4.9.** Images of medium-grained granoblastic type clasts: (A and B), (C and D), and (E and F) for T080-C6, T080-C7, and T081-C2, respectively. (A, C, and E) are XPL images, and (B, D, and F) are BSE images. The clasts consist of medium-grained (~500 μm) plagioclase and pyroxene. Due to thermal metamorphisms, the clasts exhibit exsolution texture in pyroxenes, polygonal texture, and serrated grain boundaries textures. The red line shows the boundary of the clast. High magnification images of boxes in (A)~(F) are shown in the following figures. The numbers of those are presented upper side of the boxes. Mineral abbreviations are used from that of Figure 4.2.



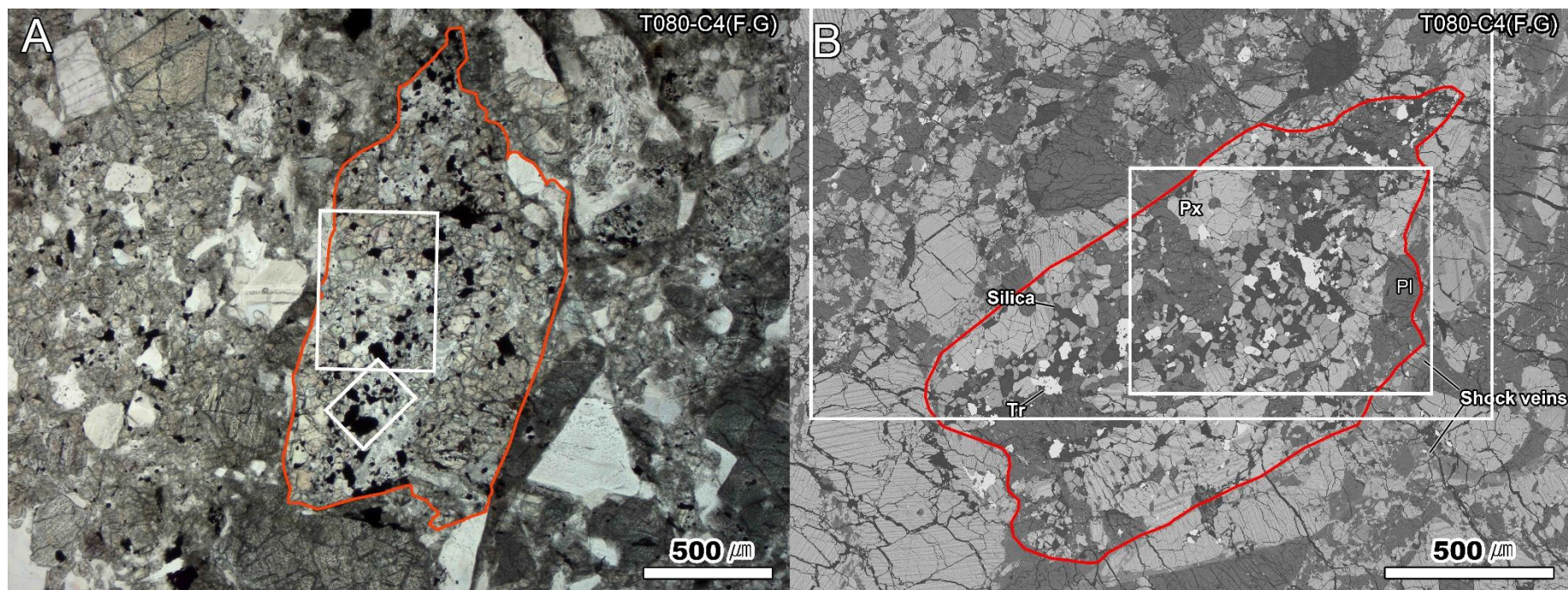


**Figure 4.10.** Images of detail textures and thermal metamorphic features in medium-grained granoblastic type clasts: (A and B), (C and D), and (E and F) for T080-C6, T080-C7, and T081-C2, respectively. (A, C, and E) are XPL images, (B and F) are BSE images. (D) is x-ray element map image (red: Si, green: Ca, blue: Al). (A) Plagioclase in T080-C6 clast exhibits serrated grain boundaries. (B) Some pyroxene of T080-C6 have very fine exsolution lamellas of high-Ca pyroxene which are parallel or perpendicular to the thick exsolution lamellas. (C) Pyroxene and plagioclase grains in T080-C7 clast form  $120^\circ$  triple junctions. (D) Pyroxenes in T080-C7 clast exhibit exsolution textures, and silica occurs as subhedral grain. (E) Euhedral or subhedral plagioclase and pyroxene in T081-C2 clast show  $120^\circ$  triple junctions. (F) Pyroxene in T081-C2 clast has exsolution texture and silica-plagioclase assemblage inclusions. The red line shows the boundary of the clast. High magnification images of boxes in (A)~(F) are shown in the following figures. The numbers of those are presented upper side of the boxes. Mineral abbreviations are used from that of Figure 4.2. Px=pyroxene



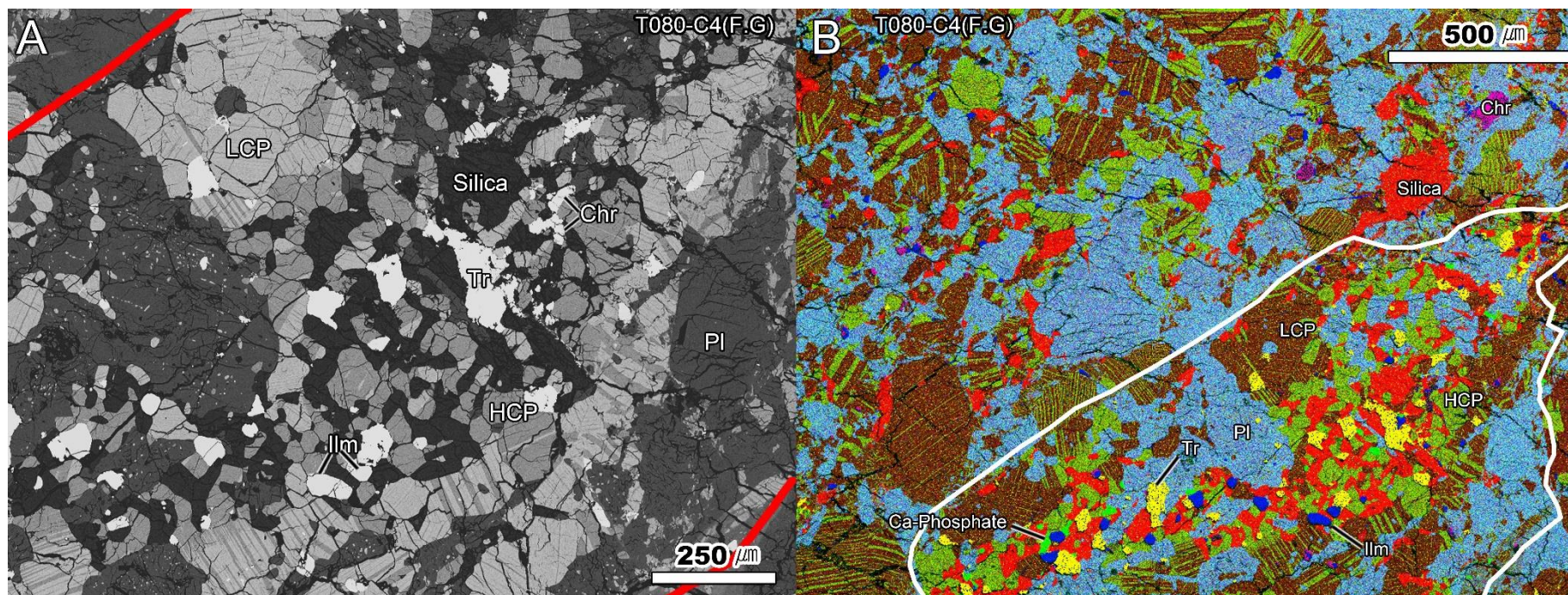
**Figure 4.11.** Images of shock metamorphic textures in medium-grained granoblastic type clasts: (A and B) for T080-C6, (C) for T080-C7, and (D) for T081-C2. (A) is XPL image, and (B, C, and D) are PPL images. (A) Twins in plagioclase are deformed and disconnected due to micro-fault. (B, C, and D) PDFs in silica of T080-C6, T080-C7, and T081-C2 are oriented to 2 directions, 3 directions, and 2 directions, respectively. The red line shows the boundary of the clast. Mineral abbreviations are used from that of Figure 4.2. Px=pyroxene





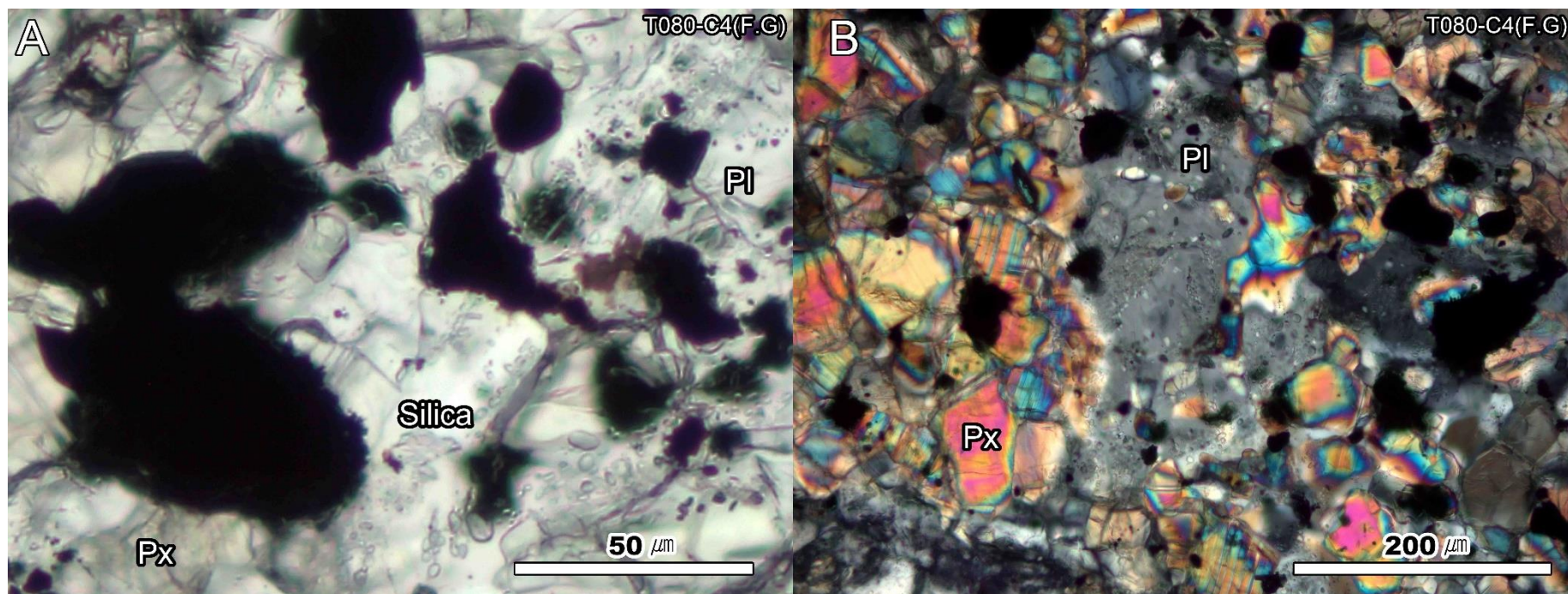
**Figure 4.12.** Images of a fine-grained granoblastic type clast (T080-C4 clast). (A) is PPL image, and (B) is BSE image. T080-C4 clasts is mainly composed by pyroxene, plagioclase, silica that form granoblastic texture. The abundance of silica and troilite is high. The red line shows the boundary of the clast. High magnification images of two boxes in (A) and (B) are shown in Figure 4.14 (A), (B) and Figure 4.13 (A), (B), respectively. The red line shows the boundary of the clast. Mineral abbreviations are used from that of Figure 4.2. Px=pyroxene





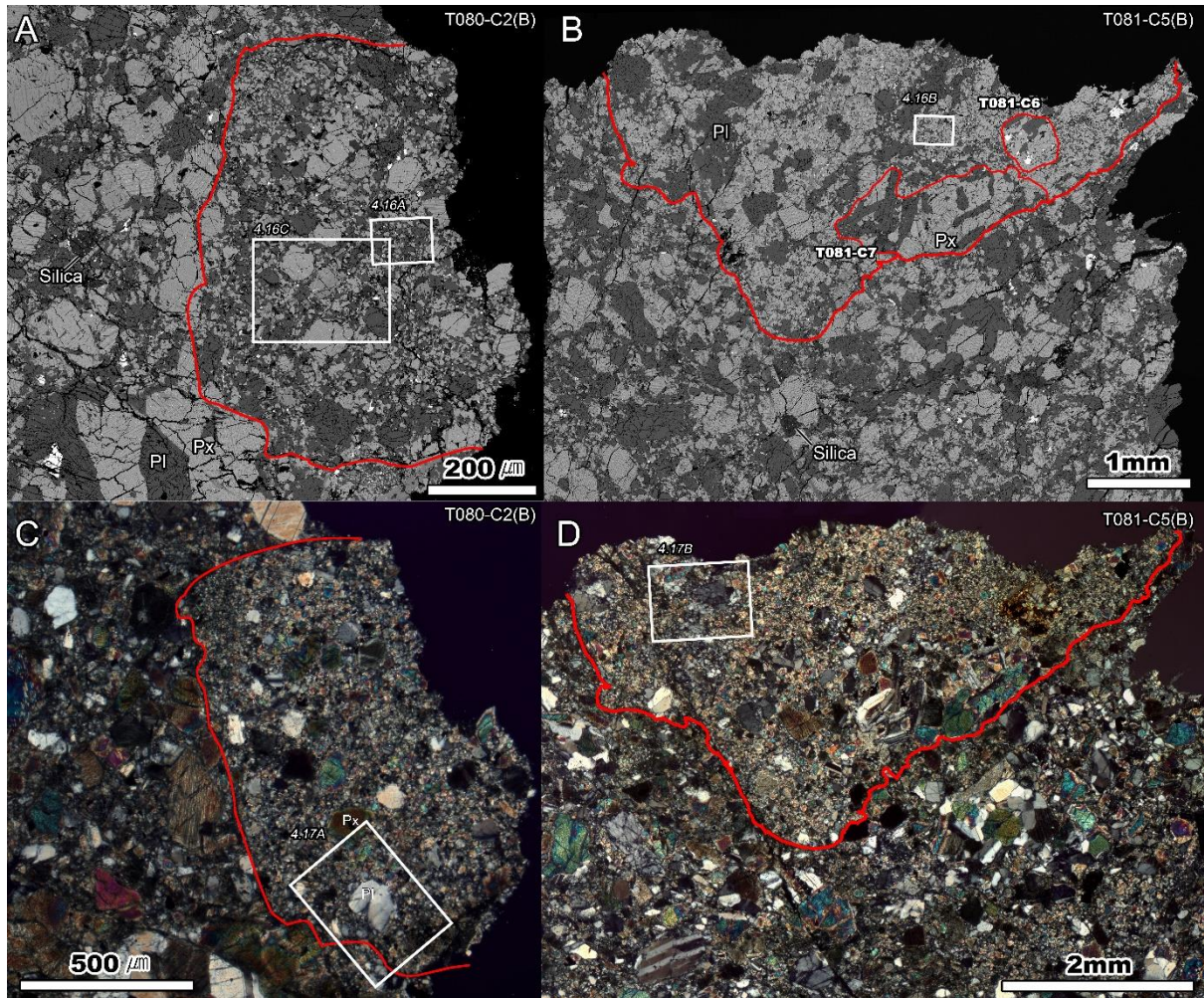
**Figure 4.13.** Images of detail textures and thermal metamorphic features in a fine-grained granoblastic clast (T080-C4 clast). (A) is BSE image, and (B) is modified X-ray element map image (red: Si, green: Ca, blue: Al). The troilite, ilmenite and chromite are presented in yellow, deep blue, and purple color respectively on the X-ray map images. (A) Silica are associated with Ca-phosphate, troilite and high-Ca pyroxene grains, that forms granoblastic texture. (B) High-Ca pyroxene, ilmenite, troilite and silica in T080-C4 clast are abundant and form granoblastic texture. Silica usually occurs as subhedral forms. The red or white line shows the boundary of the clast. Mineral abbreviations are used from that of Figure 4.2.



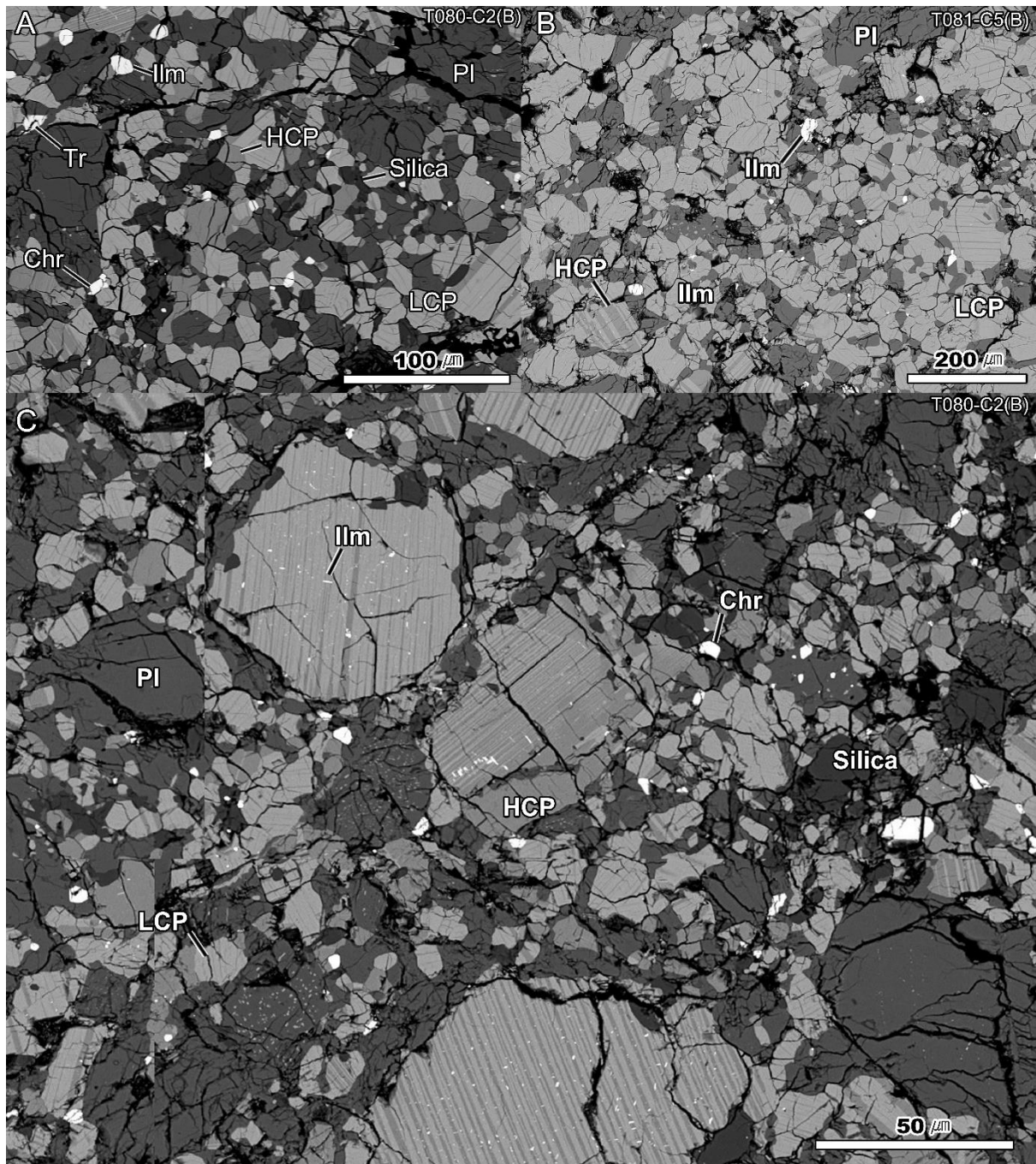


**Figure 4.14.** Images of shock metamorphic textures in a fine-grained granoblastic clast (T080-C4 clast). (A) is PPL image, and (B) is XPL image. Due to weak shock events with T080-C4 clast, PDFs is not observed in silica(A). Furthermore, undulatory extinction indicating very weak shock metamorphism does not appear in plagioclase(B). Mineral abbreviations are used from that of Figure 4.2. Px=pyroxene.



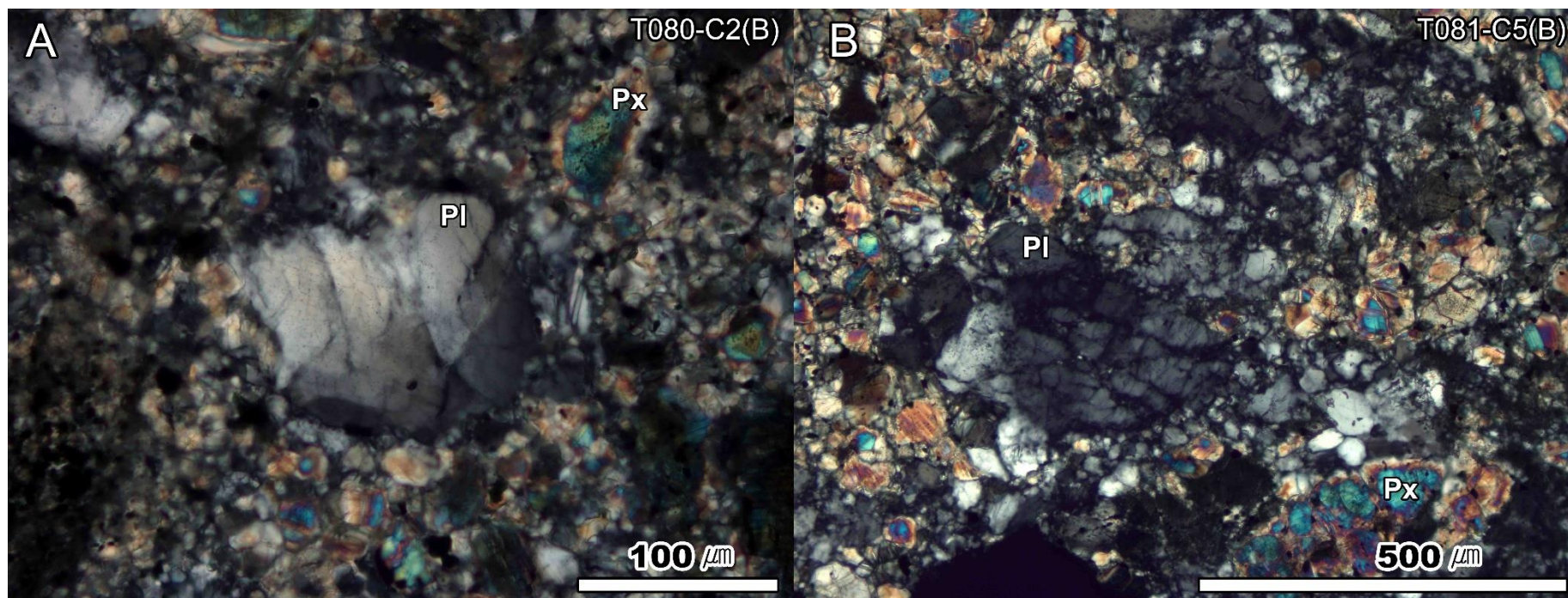


**Figure 4.15.** Images of breccia clasts. (A and C) for T080-C2, and (B and D) for T081-C5. (A and B) are BSE images, and (C and D) are XPL images. T080-C1 and T081-C5 clasts consist of fine-grained matrix, angular mineral fragments, and rock fragments. The red line shows the boundary of the clast. High magnification images of boxes in (A)~(D) are shown in the following figures. The numbers of those are presented upper side of the boxes. Mineral abbreviations are used from that of Figure 4.2. Px=pyroxene.



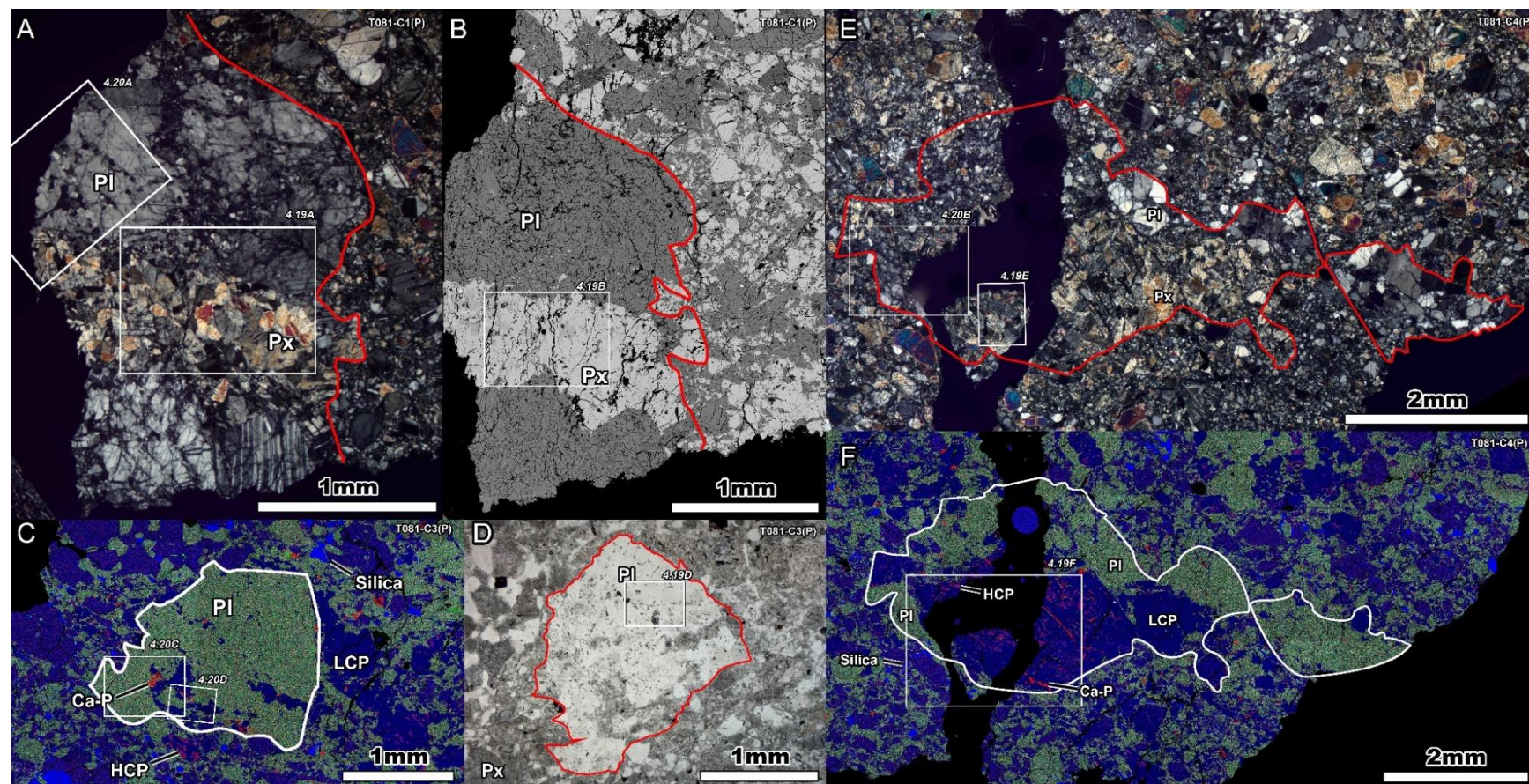
**Figure 4.16.** Images of thermal metamorphic features in breccia clasts. (A and C) for T080-C2, (B) for T081-C5. (A) The matrix of T080-C2 clast consists with pyroxene, plagioclase, silica, troilite, ilmenite, and chromite and shows partially recrystallized texture (e.g. polygonal texture). (B) The matrix of T081-C5 clast is composed by pyroxene plagioclase, ilmenite. The matrix shows recrystallized texture and abundant pyroxene. Mineral abbreviations are used from that of Figure 4.2.





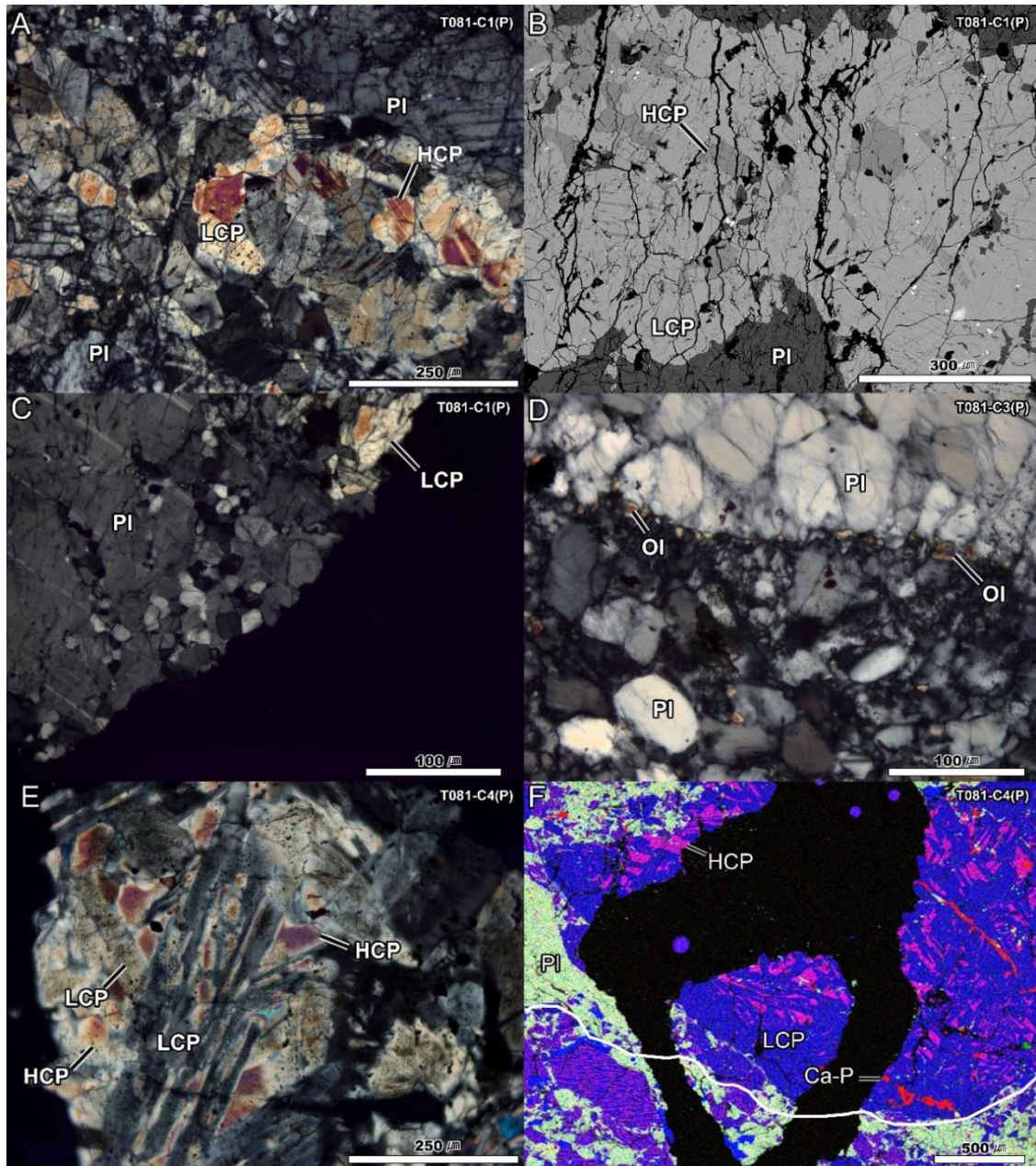
**Figures 4.17.** Images of shock metamorphic textures in breccia clasts. XPL images. (A) Plagioclase mineral fragment in T080-C2 clast shows weak undulatory extinction and irregular fractures. (B) The plagioclase in T081-C5 clast shows planar fracture and clastic texture. Pl=plagioclase, Px=pyroxene.





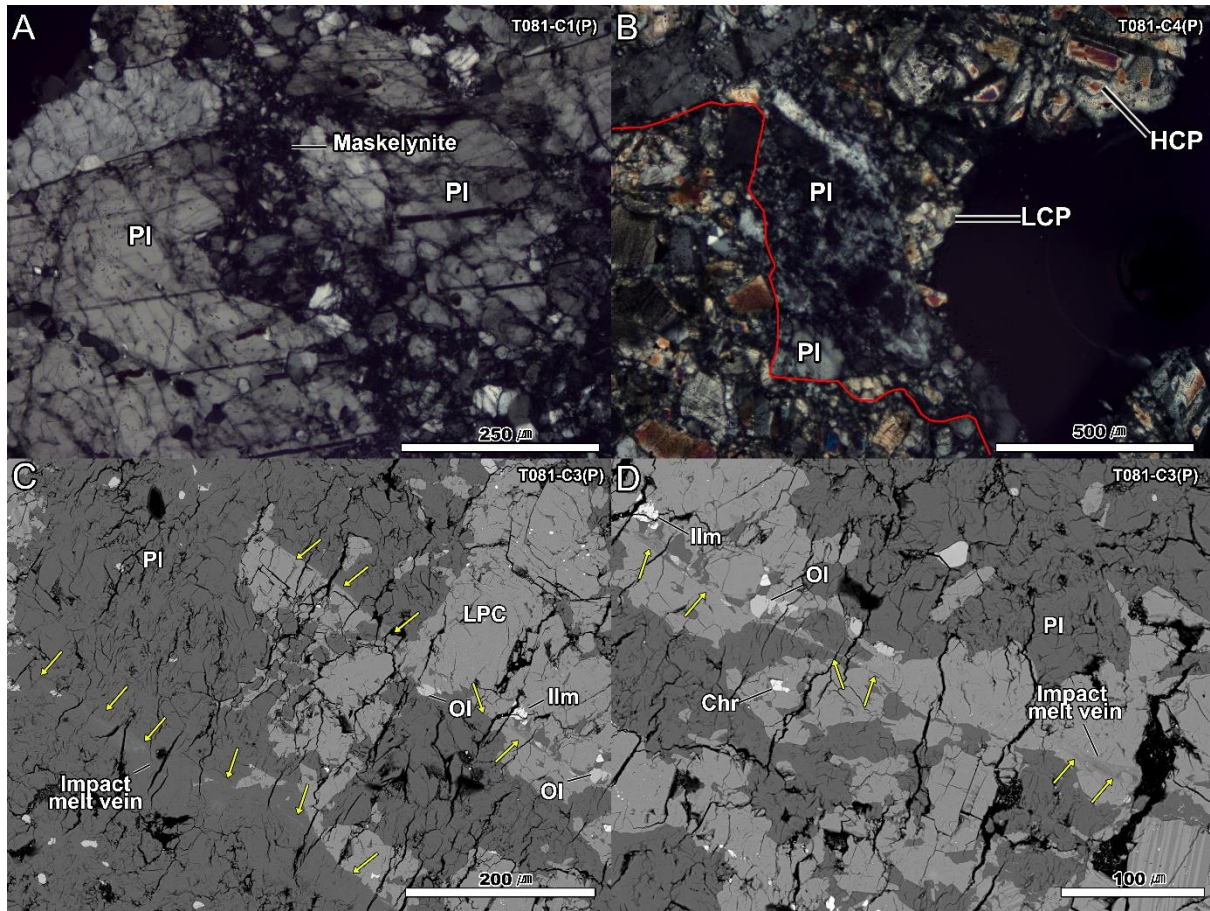
**Figure 4.18.** Images of pyroxene lath clasts: (A and B) for T081-C1 clast, (C and D) for T801-C3, and (E and F) for T081-C4. (A and E): XPL images, (B): BSE image, (C and F): X-ray element map (red: Ca, green: Al, blue: Si). Pyroxene lath clasts are mainly formed by plagioclase and pyroxene that form layered structure (A, B, C, D, and F). Plagioclase and pyroxene are not admixed with each other, and pyroxene has no exsolution texture (B, C, and F). The red or white line shows the boundary of the clast. High magnification images of boxes in (A)~(F) are shown in the following figures. The numbers of those are presented upper side of the boxes. Mineral abbreviations are used from that of Figure 4.2. Px=pyroxene, Ca-P=Calcium phosphate





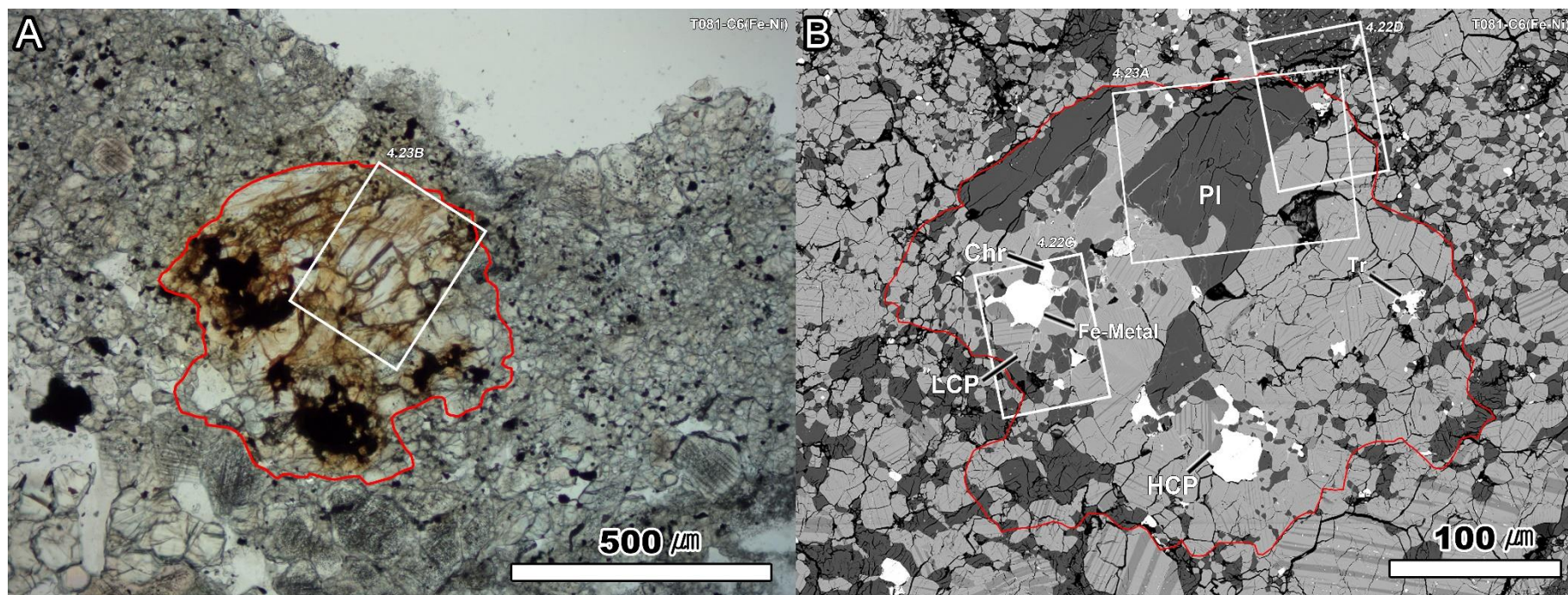
**Figure 4.19.** Images of detail textures in pyroxene lath clasts: (A and B) for T081-C1, (C and D) for T081-C3, and (E and F) for T081-C4. (A, C, D, and E): XPL images, (B): BSE image, and (F) is X-ray element map image (red: Ca, green: Al, blue: Si). (A~B) Most low-Ca pyroxenes in T081-C1 are lath shape and have no exsolution textures. High-Ca pyroxenes grains are observed and exhibit exsolution texture with low-Ca pyroxene lamellas. (C) Clastic plagioclase grains in T081-C1 clast are located between large plagioclase grains and recrystallized (D) Olivine occurs along the boundaries of plagioclase grains in T081-C3 clast. Due to impact and clastic process, the plagioclase grains show planar fractures and clastic texture. (E) Acicular low-Ca pyroxene cross-cut high-Ca pyroxene. Pyroxene shows no exsolution texture. (F) Most pyroxene in T081-C4 clast shows no exsolution texture. Ca-phosphate occurs as vein-like shape. The white line shows the boundary of the clast. Mineral abbreviations are used from that of Figure 4.2. Ca-P=Calcium phosphate.



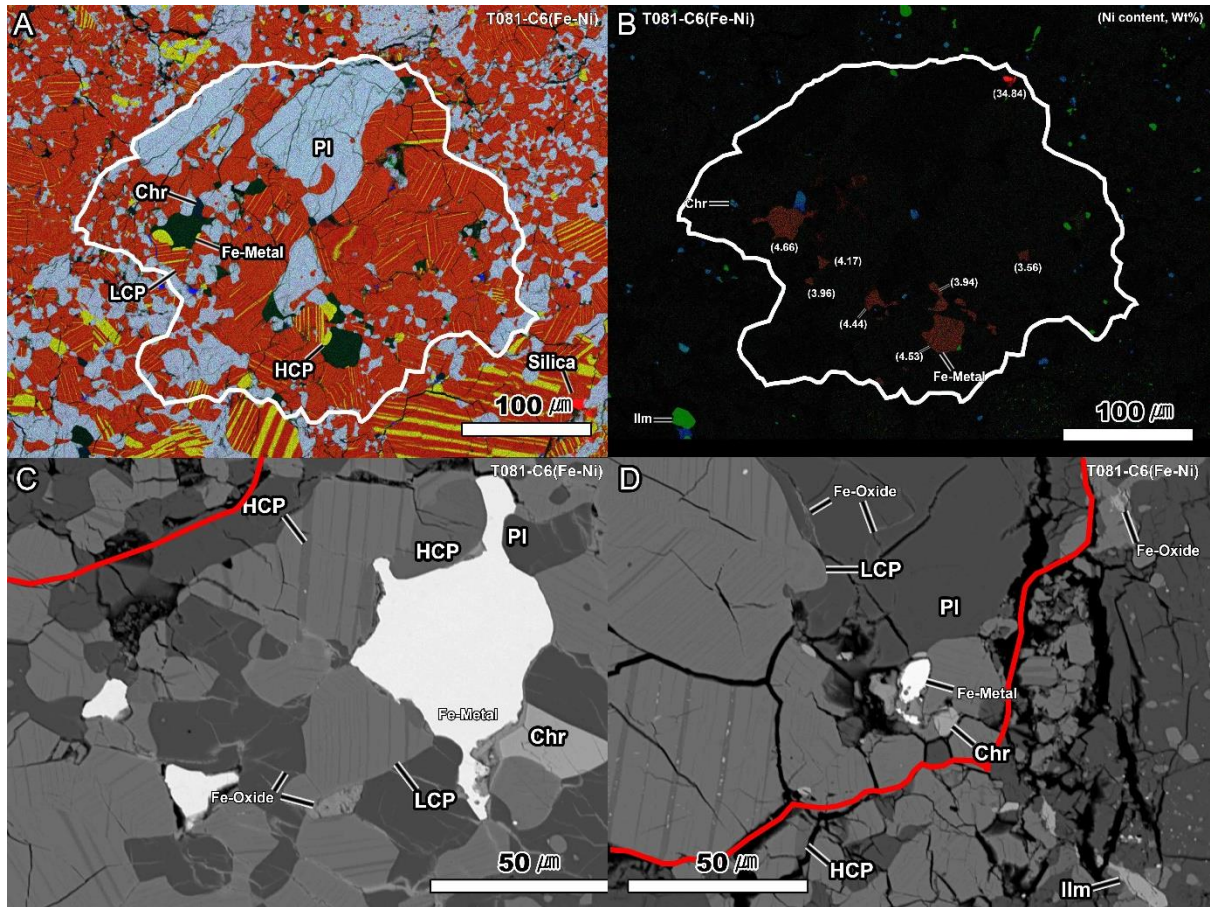


**Figure 4.20.** Images of shock metamorphic textures in pyroxene lath clasts: (A) for T081-C1. (B) for T081-C4, and (C and D) for T081-C3. (A and B) are XPL images, and (C and D) are BSE images. (A) The plagioclase in T081-C1 clast shows planar fracture, clastic texture, lowering interference color and maskelynite. (B) Plagioclase in T081-C4 clast shows clastic texture and lowering inference color. (C~D) Impact melt veins pass through the T081-C3 clast. The red line shows the boundary of the clast. Mineral abbreviations are used from that of Figure 4.2.



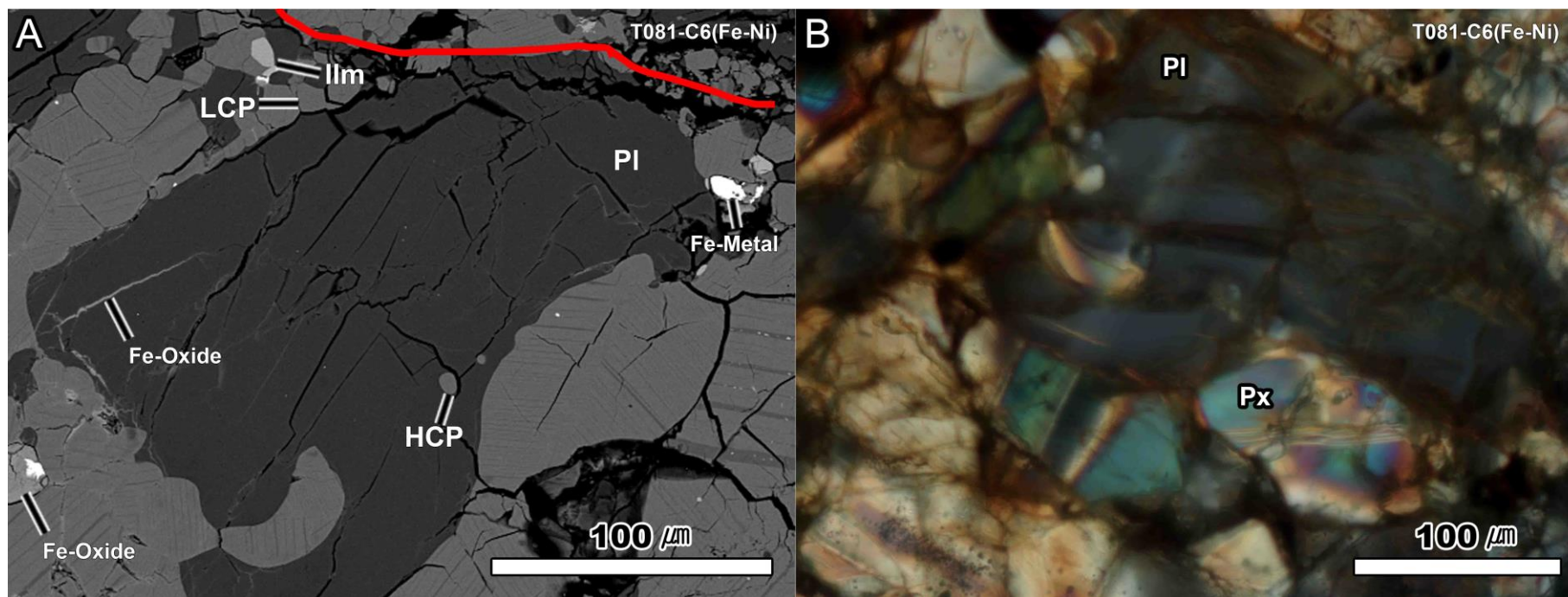


**Figure 4.21.** Images of a Fe-Ni metal bearing clast (T081-C6 clast). (A) is PPL image and (B) is BSE image. (A) T081-C6 clast located in a breccia clast(T081-C5). T081-C6 clast consists of larger grains than grains in matrix of the breccia clast(T081-C5). The clast shows yellowish staining. Due to grain size and staining, the Fe-Ni metal bearing clast is distinguished from the matrix of the breccia clast. (B) The texture of T081-C6 clasts seems intergranular texture clast, but Fe-Ni metals are abundant. The red line shows the boundary of the clast High magnification images of boxes in (A) and(B) are shown in the following figures. The numbers of those are presented upper side of the boxes. Mineral abbreviations are used from that of Figure 4.2.



**Figure 4.22.** Images of detail textures of a Fe-Ni metal bearing clast(T081-C6). (A): X-ray element map image (red: Si, green: Ca, blue: Al), (B): X-ray element map image (red: Ni green: Ti, blue: Cr), and (C and D): BSE images. (A) Most pyroxenes have thin( $<1\mu\text{m}$ ) exsolution lamellae. (B) Ni contents in most Fe-Ni metal grains are 3 wt.% ~ 5 wt.%. The grains are kamacite. A Fe-Ni metal grain have high concentration (~35 wt.%) of Ni and is taenite. (C) Fe-oxide and high-Ca pyroxene grains are associated with Fe-Ni metals. Fe-oxide fills the crack in plagioclase or grains boundaries. (D) Taenite in Fe-Ni bearing clast does not show any exsolution texture like widmanstätten patterns. The red or white line shows the boundary of the clast. Mineral abbreviations are used from that of Figure 4.2.





**Figure 4.23.** Images of shock metamorphic and weathering textures in a Fe-Ni metal bearing clast (T081-C6 clast). (A) is BSE image, and (B) is XPL image. (A) Fracture of plagioclase is weak developed, and some fractures are filled by Fe-oxide. (B) Plagioclase grain shows no undulatory extinction. The red line shows the boundary of the clast. Mineral abbreviations are used from that of Figure 4.2. Px=pyroxene

## 4.2 암편의 광물 화학 조성 및 열 변성 정도

TIL 07014의 암편의 휘석, 사장석, 감람석, 금속 철(Fe-Ni metal), 티탄 철석(ilmenite), 크롬 철석(chromite), 트로일라이트(troilite)의 조성을 전자 현미 분석기(electron probe micro-analyzer; EPMA)를 이용하여 분석하였다 (Table. 4.3~4.8). 분석 결과를 통해 암편의 열 변성 정도를 파악하거나, 전암 화학 조성을 계산하였다.

휘석의 경우 열 변성 작용을 받을수록 Fe-Mg, Ca-Mg 누대 구조가 사라지고 Ca 함량이 낮은 휘석과 높은 휘석이 각각 균일한 조성으로 평형화된다 (Takeda and Graham., 1991). 평형화된 휘석의 주원소 함량과 용리조직은 Takeda and Graham. (1991)이 제시한 열 변성 기준 중 Type 5에 해당한다. 휘석의 부원소 함량(Al, Ti, Cr 등)과 사장석의 An 함량도 열 변성 작용을 받음으로서 평형화되며, 광물 화학 조성은 휘석의 주원소 조성, 사장석의 주원소 조성, 휘석의 부원소 조성 순으로 평형화가 이루어진다 (Andersen *et al.*, 1993, Mayne *et al.*, 2009).

### 4.2.1 휘석의 조성

TIL 07014의 암편의 휘석의 조성을 휘석 사변형 도표(pyroxene quadrilateral diagram)에 도식하였다 (Table 4.3~4.4, Fig. 4.24~4.25). 구과상 조직 암편을 제외한 암편은 Ca 함량이 낮은 휘석( $Wo < 10$ )과 Ca 함량이 높은 휘석( $Wo > 35$ )으로 구분되어 각각 균일한 조성으로 평형화되었다. Ca 함량이 높은 휘석과 낮은 휘석의 중간에 해당되는 조성은 구과상 암편 중 T080-C1 암편의 경우 Ca-Mg 잔류 누대 구조의 결과이며, 그 외 암편은 전자 현미 분석기로 분석 시 용리 엽리의 Ca 함량이 높은 휘석과 Ca 함량이 낮은 휘석의 용리 엽리가 분리되지 않고 중첩되어 분석된 결과이다. T080-C1 암편을 제외한 암편의 휘석 조성은 암편에서 관찰되는 용리 조직과 함께 강한 열 변성을 지시하며 Takeda and Graham(1991)이 제시한 열 변성

기준 중 Type 5 에 해당된다. Ca-Mg 잔류 누대 구조가 나타나는 T080-C1 암편은 Takeda and Graham(1991)이 제시한 열 변성 기준 중 Type 4 에 해당한다.

TIL 07014 의 암편의 평형화된 휘석의 조성은 크게 3 개( $Wo_{1-5}En_{41-49}$ ,  $Wo_{41-44}En_{32-36}$  ;  $Wo_{2-5}En_{33-38}$ ,  $Wo_{40-44}En_{29-32}$  ;  $Wo_{2-4}En_{28-30}$ ,  $Wo_{41-43}En_{23-25}$  )로 나누어진다 (Fig. 4.25, Table 4.3~4.4). 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편의 휘석의 조성이 Mg 함량이 가장 높으며, 세립질 입상 변정질 암편이 Mg 함량이 가장 낮고, 그 외 암편들(구과상 조직 암편, 준오피틱 암편, 입간 조직 암편, 중립질 입상 변정질 암편, 각력암질 암편, 철-니켈 금속 철 함유 암편)은 중간에 해당되고 전형적인 현무암질 유크라이트(Ca 함량이 낮은 휘석의 Mg#: 32.2~45.8)의 조성에 속한다. 세립질 입상 변정질 암편의 휘석의 조성은 현무암질 유크라이트의 조성을 벗어나 있으며, 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편의 조성은 현무암질 유크라이트와 집적 유크라이트의 조성 모두에 걸쳐서 나타난다. 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편을 구성하는 암편끼리 약간의 조성 차이가 있어 침상형 휘석으로 구성된 암편(T081-C3, T081-C4)의  $Wo_{1-5}En_{41-49}$  이며, 주상형 휘석으로 구성된 암편(T081-C1) 의 Ca 함량이 낮은 휘석의 조성은  $Wo_{2-4}En_{41-44}$  이다 (Fig. 4.24F). 주상형의 휘석으로 구성된 암편은 침상형의 휘석으로 구성된 암편에 비해서 Mg 함량이 낮고 균일한 조성 범위를 나타낸다.

암편의 부원소 중 Al, Cr, Ti 을 세 원소를 꼭지점으로 하는 삼각 도표에 도식하였다 (Fig. 4.26). 휘석의 부원소 함량을 통해 암편의 열 변성 정도와 함께 휘석의 결정 순서를 파악할 수 있다 (Pun and Papike, 1996). 초기 마그마에서 Cr 함량이 높은 광물들이 결정화되면서 Cr 함량이 변하기 때문에 초기에 정출 된 휘석은 Cr 함량 변화가 크다. Al 함량이 높은 사장석과 함께 정출한 휘석은 마그마에서 Al 의 함량이 크게 변하기 때문에 휘석의 Al 함량 변화가 크다. 따라서 전자의 경우 삼각 도표에 도식하면 Al-Cr 선상에 도식되고, 후자는 Al-Ti 선상에 도식된다.

TIL 07014 의 휘석의 부원소 함량은 대부분 평형화되어 Al, Ti, Cr 삼각도표에서 군집을 이루고 있으며, 특히 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편의 부원소 함량은

가장 조밀한 군집을 이루며 평형화 되어있다 (Fig. 4.26). TIL 07014 의 암편 중 구과상 조직 암편, 입간 조직 암편, 입상 변정질 조직 암편의 휘석의 부원소 함량은 상대적으로 균집화된 정도가 작고, Cr 함량은 일정한 상태에서 Al 와 Ti 함량 비의 차이가 있다 (Fig. 4.26A, Fig. 4.26C~D).

#### 4.2.2 사장석의 조성

TIL 07014 암편 중 준오피텍 조직 암편, 중립질 입상 변정질 암편, 철-니켈 함유 암편, T080-C5 를 제외한 입간 조직 암편은 An 함량이 85.9~92.1 로 평형화되어 있다 (Table 4.5, Fig. 4.27). 구과상 조직 암편은 An 함량이 75.3~91.6 으로 상대적으로 낮은 조성까지 넓은 조성을 나타내며, 세립질 입상 변정질 암편과 T080-C5 암편도 81.4~89.2 로 낮고 넓은 조성으로 나타난다. 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편은 An 함량이 90.8~95.1 로 다른 암편에 비해서 상대적으로 높은 조성 범위까지 나타낸다. An 함량의 평형화 정도는 구과상 조직 암편, 세립질 입상 변정질 암편과 T080-C5 암편, 대부분의 암편들(준오피텍 조직 암편, 중립질 입상 변정질 암편, 철-니켈 함유 암편, T080-C5 를 제외한 입간 조직 암편), 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편 순으로 평형화 정도가 높아진다. 현무암질 유크라이트의 사장석의 An 함량은 76~91 이며, 집적 유크라이트는 90~95 이다 (Mittlefehldt, 2015). 따라서 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편의 사장석 조성은 집적 유크라이트에 해당하며, 그 외 암편은 현무암질 유크라이트에 해당한다.

#### 4.2.3 감람석의 조성

감람석은 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편에서만 산출되어 조성은  $\text{Fa}_{72.6\sim74.4}$  로 철(Fe) 함량이 풍부하다 (Table 4.6). 일반적으로 HED 중그룹에서 일반적으로 단사 휘석(clinopyroxene)과 함께 디오제나이트를 구성하는 감람석은 상대적으로 마그네슘(Mg) 함량이 풍부하여  $\text{Fa}_{14\sim39}$ 에 해당한다 (Mittlefehldt, 2015). 따라서 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편 내 감람석은 디오제나이트 기원의 감람석에 해당하지 않는다.

#### 4.2.4 금속 철 조성

철-니켈 금속 철 함유 암편에서 관찰되는  $5\mu\text{m}\sim65\mu\text{m}$  크기이며 니켈(Ni) 함량은 대부분이 3 wt.% ~ 5 wt.% 로 카마사이트(kamacite)에 해당되고 하나만 34.8 wt.%로 태나이트(taenite)에 해당한다 (Table 4.6, Fig. 4.28~4.29). 유크라이트에서 관찰되는 금속 철은 철 함량이 높은 휘석이 환원 과정을 거쳐 생성되거나, 유크라이트 모체에 충돌한 충돌체(e.g. 콘드라이트) 내 금속 철에서 기원한다 (Lorenz *et al.*, 2007; Yamaguchi *et al.*, 2006). 환원과정으로 생성된 금속 철들은 니켈(Ni)의 함량이 0.1 wt.% 이하, 니켈(Ni)/코발트(Co)의 비가 5 미만이고, 외래 기원의 금속 철들은 Ni/Co의 비가 10 이상으로 구분이 된다. L 타입 또는 LL 타입의 오디너리 콘드라이트(e.g. Chaipur, Olivenza; Afiattalab and Wasson, 1979) 내 카마사이트 중 일부는 Ni/Co의 비가 10 이하이나 코발트(Co) 함량 및 니켈(Ni) 함량이 0.5 wt.% 이상으로 환원과정으로 생성된 금속 철과 잘 구분된다. T081-C6 암편의 경우 카마사이트와 태나이트의 니켈 및 코발트 함량은 오디너리 콘드라이트 중 LL 또는 L 타입의 금속 철과 유사하다 (Fig. 4.28~4.29).

**Table 4.3.** Average composition of high Ca-Pyroxene in clasts (wt.%, Atoms for 6 oxygen).

	Variolitic clast		Subophitic	Breccia clast			
	T079-C7	T080-C1	T079-C2, T080-C3	T080-C2		T081-C5	
				Fragments	Matrix	Fragments	Matrix
	High-Ca Pyx(n=5)	High-Ca Pyx(n=18)	High-Ca Pyx(n=14)	High-Ca Pyx(n=8)	High-Ca Pyx(n=10)	High-Ca Pyx(n=2)	High-Ca Pyx(n=4)
SiO <sub>2</sub>	51.45	51.10	50.97	51.40	51.20	51.63	51.45
TiO <sub>2</sub>	0.27	0.28	0.45	0.31	0.30	0.26	0.34
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.58	0.54	0.57	0.54	0.57	0.61	0.57
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.28	0.25	0.28	0.28	0.28	0.27	0.31
FeO	16.54	16.36	17.58	16.86	16.68	17.64	17.73
MnO	0.53	0.52	0.53	0.51	0.51	0.51	0.55
MgO	10.49	10.37	9.90	10.38	10.30	10.02	9.95
CaO	19.76	19.80	19.57	19.94	19.72	19.98	19.63
Na <sub>2</sub> O	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.10	0.08
K <sub>2</sub> O	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	<0.01
Total	99.98	99.30	99.94	100.29	99.63	101.06	100.60
Si	1.981	1.981	1.974	1.977	1.980	1.977	1.979
Ti	0.008	0.008	0.013	0.009	0.009	0.008	0.010
Al	0.026	0.025	0.026	0.025	0.026	0.028	0.026
Cr	0.008	0.008	0.009	0.008	0.008	0.008	0.009
Fe	0.533	0.531	0.570	0.542	0.540	0.565	0.570
Mn	0.017	0.017	0.018	0.017	0.017	0.017	0.018
Mg	0.602	0.599	0.571	0.595	0.594	0.572	0.570
Ca	0.815	0.823	0.812	0.822	0.817	0.820	0.809
Na	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.007	0.006
K	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	0.001	b.d.
O	2.594	2.575	2.578	2.596	2.582	2.608	2.597
Total	3.997	3.997	3.998	4.000	3.996	4.002	3.997
Wo	41.8	42.1	41.6	2.8	41.9	41.9	41.5
En	30.9	30.7	29.3	35.1	30.5	29.2	29.3
Fs	27.3	27.2	29.2	62.1	27.7	28.9	29.2

b.d.: below detection limit.

**Table 4.3.** Average composition of high Ca-Pyroxene in clasts(continued).

	Intergranular	Medium grained granoblastic clast	Fine grained granoblastic clast	Pyroxene lath clast		Fe-Ni metal bearing clast
	T079-C1, T079-C3 T080-C5, T081-C7	T080-C6, T080-C7 T081-C2	T080-C4	T081-C3 T081-C4	T081-C1	T081-C6
	High-Ca Pyx(n=31)	High-Ca Pyx(n=32)	High-Ca Pyx(n=22)	High-Ca Pyx(n=28)	High-Ca Pyx(n=13)	High-Ca Pyx(n=1)
SiO <sub>2</sub>	51.07	51.01	50.19	51.96	51.50	50.97
TiO <sub>2</sub>	0.32	0.28	0.39	0.30	0.37	0.23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.61	0.56	0.59	0.61	0.71	0.40
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.27	0.26	0.27	0.23	0.31	0.20
FeO	16.97	17.06	20.14	13.70	15.35	17.06
MnO	0.52	0.54	0.60	0.43	0.48	0.43
MgO	10.16	10.14	8.10	12.21	11.10	10.57
CaO	19.82	19.60	19.24	20.40	20.22	19.35
Na <sub>2</sub> O	0.07	0.08	0.06	0.06	0.06	0.03
K <sub>2</sub> O	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Total	99.82	99.53	99.58	99.90	100.13	99.24
Si	1.975	1.979	1.976	1.978	1.970	1.981
Ti	0.009	0.008	0.011	0.009	0.011	0.007
Al	0.028	0.026	0.027	0.027	0.032	0.018
Cr	0.008	0.008	0.008	0.007	0.009	0.006
Fe	0.549	0.554	0.663	0.436	0.491	0.555
Mn	0.017	0.018	0.020	0.014	0.016	0.014
Mg	0.586	0.586	0.475	0.692	0.633	0.613
Ca	0.821	0.815	0.811	0.832	0.829	0.806
Na	0.005	0.006	0.005	0.004	0.005	0.002
K	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.
O	2.582	2.574	2.537	2.624	2.610	2.569
Total	4.000	3.999	3.998	3.999	3.996	4.002
Wo	42.0	41.7	41.6	42.4	42.4	40.8
En	30.0	30.0	24.4	35.3	32.4	31.0
Fs	28.1	28.3	34.0	22.2	25.2	28.1

b.d.: below detection limit.

**Table 4.4.** Average composition of low Ca-Pyroxene in clasts (wt.%, Atoms for 6 oxygen)

	Variolitic clast		Subophitic	Breccia clast			
	T079-C7	T080-C1	T079-C2, T080-C3	T080-C2		T081-C5	
				Fragments	Matrix	Fragments	Matrix
	Low-Ca Pyx(n=22)	Low-Ca Pyx(n=12)	Low-Ca Pyx(n=14)	Low-Ca Pyx(n=8)	Low-Ca Pyx(n=4)	Low-Ca Pyx(n=3)	Low-Ca Pyx(n=4)
SiO <sub>2</sub>	49.67	49.69	49.69	49.80	49.56	50.04	50.13
TiO <sub>2</sub>	0.16	0.14	0.22	0.14	0.12	0.16	0.15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.18	0.21	0.24	0.16	0.30	0.17	0.17
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.06	0.09	0.09	0.12	0.08	0.10	0.07
FeO	34.99	34.65	35.92	34.85	34.96	35.86	35.50
MnO	1.10	1.09	1.12	1.11	1.10	1.15	1.10
MgO	11.92	11.94	11.41	12.11	11.90	11.52	11.44
CaO	1.34	1.48	1.23	1.07	1.25	1.19	1.44
Na <sub>2</sub> O	0.02	<0.01	0.03	<0.01	0.02	<0.01	<0.01
K <sub>2</sub> O	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Total	99.46	99.32	99.97	99.39	99.30	100.20	100.03
Si	1.995	1.996	1.993	1.998	1.993	1.999	2.004
Ti	0.005	0.004	0.007	0.004	0.004	0.005	0.005
Al	0.008	0.010	0.011	0.007	0.014	0.008	0.008
Cr	0.002	0.003	0.003	0.004	0.003	0.003	0.002
Fe	1.175	1.164	1.205	1.170	1.176	1.198	1.187
Mn	0.038	0.037	0.038	0.038	0.038	0.039	0.037
Mg	0.714	0.715	0.682	0.724	0.713	0.686	0.682
Ca	0.057	0.064	0.053	0.046	0.054	0.051	0.062
Na	0.002	b.d.	0.002	b.d.	0.001	b.d.	b.d.
K	0.001	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.
O	2.487	2.486	2.490	2.489	2.483	2.499	2.499
Total	3.996	3.994	3.995	3.993	3.996	3.990	3.987
Wo	2.9	3.3	2.7	2.8	2.8	2.6	3.2
En	36.7	36.8	35.2	35.1	36.7	35.5	35.3
Fs	60.4	59.9	62.1	62.1	60.5	61.9	61.5

b.d.: below detection limit.



**Table 4.4.** Average composition of low Ca-Pyroxene in clasts(continued).

	Intergranular	Medium grained granoblastic clast	Fine grained granoblastic clast	Pyroxene lath clast		Fe-Ni metal bearing clast
	T079-C1, T079-C3 T080-C5, T081-C7	T080-C6, T080-C7 T081-C2	T080-C4	T081-C3 T081-C4	T081-C1	T081-C6
	Low-Ca Pyx(n=22)	Low-Ca Pyx(n=32)	Low-Ca Pyx(n=21)	Low-Ca Pyx(n=64)	Low-Ca Pyx (n=9)	Low-Ca Pyx(n=10)
SiO <sub>2</sub>	49.54	49.53	46.28	50.77	50.61	49.69
TiO <sub>2</sub>	0.15	0.13	2.68	0.21	0.19	0.18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.19	0.18	0.17	0.36	0.40	0.32
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.09	0.09	0.09	0.14	0.13	0.11
FeO	35.39	35.30	39.09	30.66	32.07	35.73
MnO	1.12	1.12	1.19	0.89	0.93	1.13
MgO	11.59	11.57	8.62	15.21	14.09	11.54
CaO	1.40	1.48	1.19	1.23	1.38	1.29
Na <sub>2</sub> O	<0.01	0.05	<0.01	<0.01	0.02	<0.01
K <sub>2</sub> O	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	<0.01
Total	99.49	99.46	99.32	99.47	99.83	100.00
Si	1.994	1.994	1.900	1.990	1.991	1.991
Ti	0.005	0.004	0.101	0.006	0.006	0.005
Al	0.009	0.009	0.008	0.016	0.018	0.015
Cr	0.003	0.003	0.003	0.004	0.004	0.003
Fe	1.191	1.189	1.359	1.005	1.056	1.197
Mn	0.038	0.038	0.042	0.030	0.031	0.038
Mg	0.695	0.694	0.528	0.889	0.827	0.689
Ca	0.060	0.064	0.052	0.052	0.058	0.055
Na	b.d.	0.004	b.d.	b.d.	0.001	b.d.
K	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	0.001	b.d.
O	2.481	2.481	2.410	2.547	2.538	2.493
Total	3.996	3.998	3.994	3.994	3.993	3.995
Wo	3.1	3.3	2.7	2.6	3.0	2.8
En	35.7	35.7	27.2	45.7	42.6	35.5
Fs	61.2	61.1	70.1	51.7	54.4	61.7

b.d.: below detection limit.

**Table 4.5.** Average composition of plagioclase in clasts (wt.%, Atoms for 8 oxygen)

	Variolitic clast		Subophitic	Breccia clast			
	T079-C7	T080-C1	T079-C2, T080-C3	T080-C2		T081-C5	
	Plag (n=7)	Plag (n=9)	Plag (n=16)	Fragments Plag (n=7)	Matrix Plag (n=7)	Fragments Plag (n=3)	Matrix Plag (n=3)
SiO <sub>2</sub>	48.28	46.23	46.15	46.84	46.58	46.67	46.26
TiO <sub>2</sub>	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.02	<0.02	0.02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32.48	33.76	34.25	33.77	34.08	34.72	34.89
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
FeO	0.65	0.77	0.55	0.31	0.57	0.31	0.67
MnO	0.02	0.02	<0.01	0.02	0.02	<0.01	<0.01
MgO	0.03	0.15	<0.01	<0.01	0.02	0.03	0.02
CaO	15.98	17.84	17.82	17.38	17.70	18.31	18.13
Na <sub>2</sub> O	2.15	1.21	1.22	1.51	1.37	1.18	1.16
K <sub>2</sub> O	0.18	0.07	0.08	0.11	0.11	0.06	0.07
Total	99.79	100.08	100.13	99.96	100.48	101.32	101.23
Si	2.220	2.133	2.125	2.155	2.137	2.123	2.110
Ti	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	0.001	b.d.	0.001
Al	1.761	1.836	1.859	1.832	1.843	1.861	1.875
Cr	0.001	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.
Fe	0.025	0.030	0.021	0.012	0.022	0.012	0.025
Mn	0.001	0.001	b.d.	0.001	0.001	b.d.	b.d.
Mg	0.002	0.010	b.d.	b.d.	0.002	0.002	0.001
Ca	0.788	0.882	0.880	0.857	0.870	0.892	0.885
Na	0.191	0.109	0.109	0.134	0.122	0.104	0.103
K	0.011	0.004	0.005	0.006	0.006	0.004	0.004
O	2.895	2.886	2.891	2.893	2.901	2.927	2.920
Total	5.000	5.005	5.001	4.999	5.004	4.999	5.005
Ab	0.19	9.3	11.0	13.5	12.2	10.4	10.4
An	0.80	90.4	88.5	85.9	87.2	89.3	89.2
Or	0.01	0.3	0.5	0.6	0.6	0.4	0.4

b.d.: below detection limit.

**Table 4.5.** Average composition of plagioclase in clasts(continued).

	Intergranular	Medium grained granoblastic clast	Fine grained granoblastic clast	Pyroxene lath clast		Fe-Ni metal bearing clast
	T079-C1, T079-C3 T080-C5, T081-C7 Plag (n=28)	T080-C6, T080-C7 T081-C2 Plag (n=29)	T080-C4 Plag (n=11)	T081- C3 T081- C4 Plag (n=52)	T081-C1 Plag (n=16)	T081-C6 Plag (n=6)
SiO <sub>2</sub>	46.20	46.09	46.91	44.86	45.19	45.79
TiO <sub>2</sub>	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33.67	34.08	33.65	35.10	35.12	34.65
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
FeO	0.24	0.33	0.63	0.24	0.35	0.52
MnO	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	<0.01	<0.01
MgO	<0.01	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02
CaO	17.43	17.74	17.05	18.81	19.03	18.03
Na <sub>2</sub> O	1.40	1.28	1.57	0.75	0.86	1.08
K <sub>2</sub> O	0.10	0.09	0.12	0.05	0.05	0.07
Total	99.07	99.67	99.99	99.86	100.63	100.20
Si	2.146	2.130	2.160	2.075	2.077	2.108
Ti	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	0.001
Al	1.843	1.857	1.826	1.913	1.902	1.880
Cr	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.
Fe	0.009	0.013	0.024	0.009	0.013	0.020
Mn	b.d.	b.d.	0.001	b.d.	b.d.	b.d.
Mg	b.d.	0.002	0.001	0.002	0.001	0.001
Ca	0.867	0.878	0.841	0.932	0.937	0.889
Na	0.126	0.114	0.140	0.067	0.076	0.096
K	0.006	0.005	0.007	0.003	0.003	0.004
O	2.867	2.881	2.892	2.879	2.897	2.892
Total	4.998	5.001	5.001	5.003	5.011	5.001
Ab	12.6	11.5	14.2	6.7	7.5	9.7
An	86.8	88.0	85.1	93.0	92.2	89.9
Or	0.6	0.5	0.7	0.3	0.3	0.4

b.d.: below detection limit.

**Table 4.6.** Average composition of olivine, metal, and troilite in clasts (wt.%, Atoms for 4 oxygen for olivine)

Pyroxene lath clast		Fe-Ni metal bearing clast			Pyroxene lath clast	
T081-C3 T081-C4		T081-C6			T081-C4	
olivine (n=30)		taenite (n=1)	kamacite (N=7)		troilite(n=1)	
SiO <sub>2</sub>	31.83				SiO <sub>2</sub>	0.13
TiO <sub>2</sub>	<0.02				TiO <sub>2</sub>	0.67
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.09				Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04				Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.15
FeO	54.59	Si	0.08	0.07	FeO	79.79
MnO	1.16	P	<0.01	<0.01	MnO	0.00
MgO	10.89	S	<0.01	<0.01	MgO	0.03
CaO	0.24	Ni	34.84	4.18	CaO	0.12
Na <sub>2</sub> O	0.02	Fe	63.28	95.35	Na <sub>2</sub> O	0.01
K <sub>2</sub> O	<0.01	Co	0.88	0.70	K <sub>2</sub> O	0.00
Total	98.87	Total	99.08	100.31	Total	80.95
Si	1.002					
Ti	b.d.					
Al	0.003					
Cr	0.001					
Fe	1.438					
Mn	0.031					
Mg	0.511					
Ca	0.008					
Na	0.001					
K	b.d.					
O	2.114					
Total	2.996					
Fa	0.74	Ni/Co	39.50	5.93		
Fo	0.26					

b.d.: below detection limit.

**Table 4.7.** Average composition of ilmenite in clasts (wt.%, Atoms for 3 oxygen)

	Variolitic clast		Subophitic	Breccia clast
	T079-C7	T080-C1	T079-C2, T080-C3	T081-C5
	Ilmenite (n=1)	Ilmenite (n=2)	Ilmenite (n=6)	Matrix Ilmenite (n=4)
SiO <sub>2</sub>	0.09	0.21	0.06	0.15
TiO <sub>2</sub>	52.37	52.02	52.19	52.18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	0.06	<0.02	0.05
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.09	0.07	0.33	0.54
FeO	45.32	44.14	45.91	44.86
MnO	0.89	0.82	0.97	0.89
MgO	0.70	0.54	0.52	0.48
CaO	0.16	0.36	0.20	0.20
Na <sub>2</sub> O	<0.01	0.05	<0.01	<0.01
K <sub>2</sub> O	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Total	99.66	98.27	100.21	99.36
Si	0.002	0.005	0.001	0.004
Ti	0.993	0.997	0.988	0.992
Al	0.001	0.002	b.d.	0.002
Cr	0.002	0.001	0.007	0.011
Fe	0.955	0.941	0.966	0.948
Mn	0.019	0.018	0.021	0.019
Mg	0.026	0.020	0.019	0.018
Ca	0.004	0.010	0.005	0.006
Na	b.d.	0.003	b.d.	b.d.
K	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.
O	1.981	1.959	1.985	1.977
Total	2.003	1.997	2.008	1.999

b.d.: below detection limit.

**Table 4.7.** Average composition of ilmenite in clasts(continued).

	Medium grained granoblastic clast	Fine grained granoblastic clast	Pyroxene lath clast
	T080-C6, T080-C7 T081- C2	T080-C4	T081-C3 T081-C4
	Ilmenite (n=11)	Ilmenite (n=6)	Ilmenite (n=11)
SiO <sub>2</sub>	0.10	0.07	0.05
TiO <sub>2</sub>	52.20	53.02	52.81
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	<0.02	0.04
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.21	0.06	0.25
FeO	45.08	45.72	45.15
MnO	0.96	0.93	0.96
MgO	0.47	0.39	0.66
CaO	0.22	0.12	0.15
Na <sub>2</sub> O	0.02	0.02	<0.01
K <sub>2</sub> O	<0.01	<0.01	<0.01
Total	99.31	100.35	100.10
Si	0.003	0.002	0.001
Ti	0.994	0.999	0.996
Al	0.001	b.d.	0.001
Cr	0.004	0.001	0.005
Fe	0.954	0.958	0.947
Mn	0.020	0.020	0.020
Mg	0.018	0.015	0.025
Ca	0.006	0.003	0.004
Na	0.001	0.001	b.d.
K	b.d.	b.d.	b.d.
O	1.973	1.993	1.992
Total	2.001	1.999	2.000

b.d.: below detection limit.

**Table 4.8.** Average composition of chromite in clasts (wt.%, Atoms for 4 oxygen)

	Variolitic clast	Subophitic	Breccia clast		Intergranular
	T081-C1	T079-C2, T080-C3	T081-C5		T079-C1, T079-C3 T080-C5, T081-C7
	Chromite (n=1)	Chromite (n=9)	Fragments Chromite (n=3)	Matrix Chromite (n=1)	Chromite (n=14)
SiO <sub>2</sub>	0.22	0.24	0.09	0.14	0.04
TiO <sub>2</sub>	9.19	5.76	8.94	3.99	4.64
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.90	8.82	5.71	7.24	7.32
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	42.01	44.47	43.24	50.60	49.88
FeO	39.08	37.02	39.20	35.76	36.29
MnO	0.66	0.59	0.70	0.52	0.62
MgO	0.51	0.44	0.39	0.28	0.46
CaO	0.34	0.09	0.06	0.18	0.04
Na <sub>2</sub> O	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
K <sub>2</sub> O	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Total	96.92	97.45	98.34	98.71	99.31
Si	0.008	0.009	0.003	0.005	0.001
Ti	0.258	0.159	0.247	0.109	0.126
Al	0.216	0.377	0.247	0.310	0.311
Cr	1.240	1.281	1.254	1.454	1.424
Fe	1.220	1.130	1.203	1.087	1.096
Mn	0.021	0.018	0.022	0.016	0.019
Mg	0.028	0.024	0.021	0.015	0.025
Ca	0.014	0.003	0.002	0.007	0.001
Na	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.
K	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.
O	1.811	1.833	1.815	1.807	1.844
Total	3.006	3.003	3.000	3.004	3.005

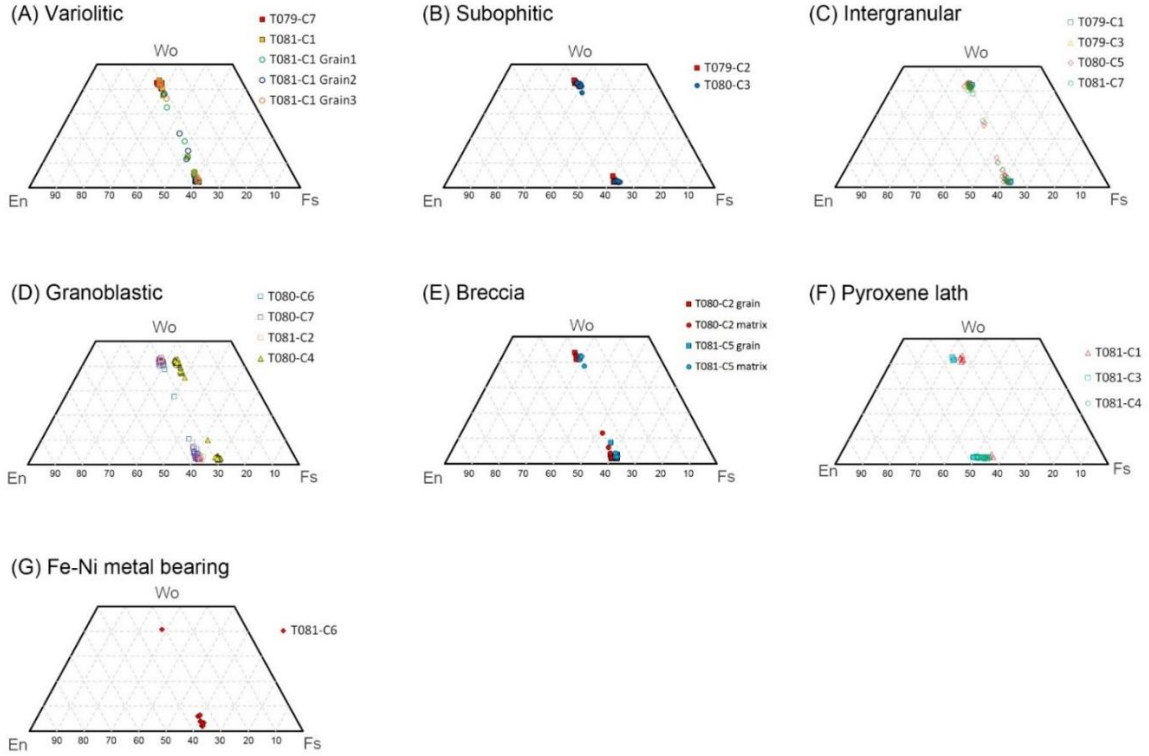
b.d.: below detection limit.

**Table 4.8.** Average composition of chromite in clasts (continued).

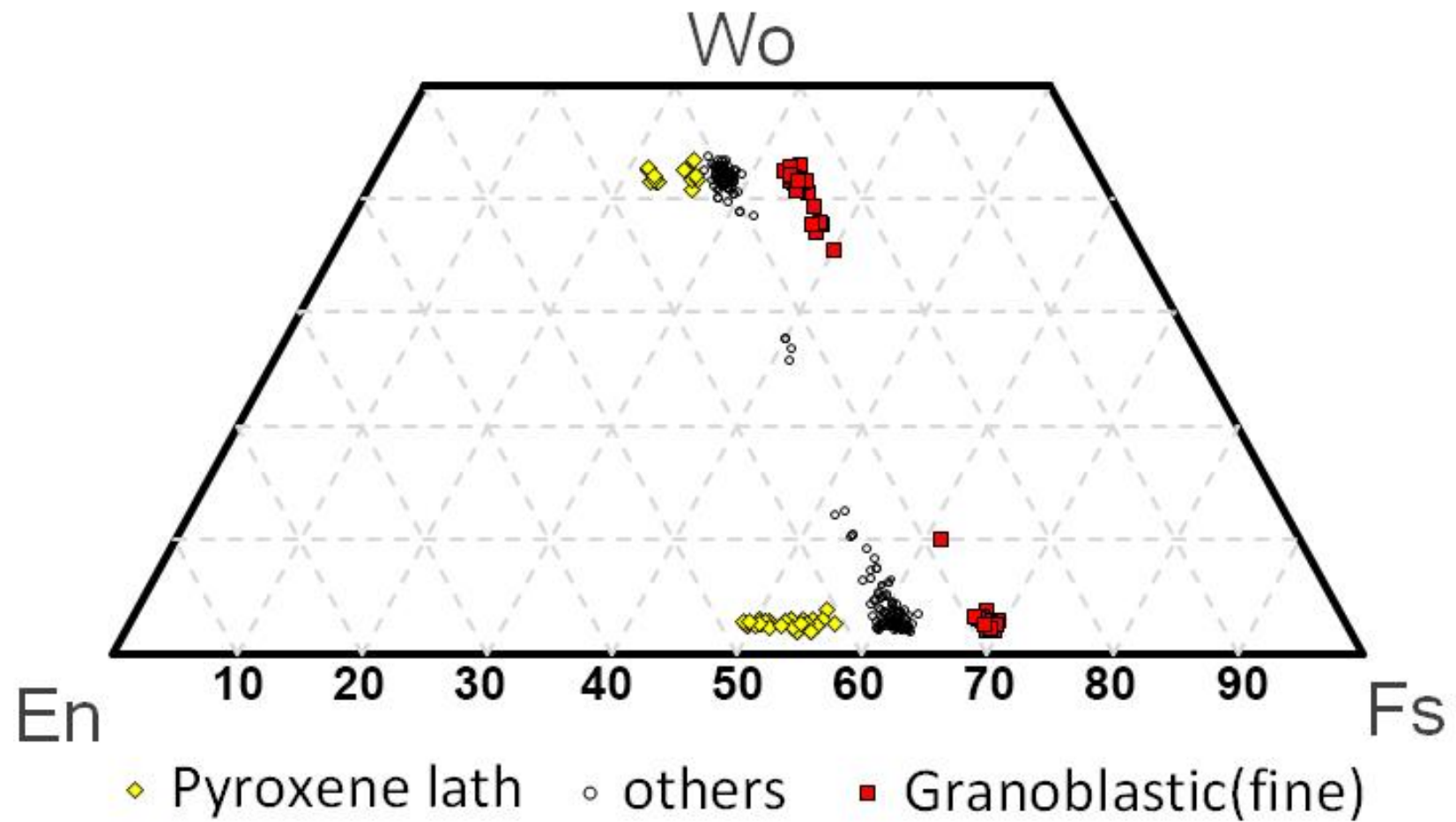
	Medium grained granoblastic clast	Pyroxene lath clast		Fe-Ni metal bearing clast
	T080-C6, T080-C7 T081-C2	T081-C3 T081-C4	T081-C1	T081-C6
	Chromite (n=3)	Chromite (n=14)	Chromite (n=1)	Chromite (n=1)
SiO <sub>2</sub>	0.27	0.07	<0.03	0.10
TiO <sub>2</sub>	4.38	5.84	6.04	4.65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.79	7.37	6.61	8.19
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	46.55	47.42	47.55	46.81
FeO	36.19	37.01	37.39	35.12
MnO	0.63	0.63	0.72	0.57
MgO	0.62	0.53	0.60	0.26
CaO	0.07	0.05	0.04	0.16
Na <sub>2</sub> O	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
K <sub>2</sub> O	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Total	98.51	98.94	98.95	95.88
Si	0.010	0.003	b.d.	0.004
Ti	0.118	0.159	0.165	0.130
Al	0.415	0.314	0.283	0.359
Cr	1.320	1.356	1.367	1.376
Fe	1.087	1.120	1.137	1.092
Mn	0.019	0.019	0.022	0.018
Mg	0.033	0.029	0.032	0.014
Ca	0.003	0.002	0.002	0.006
Na	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.
K	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.
O	1.826	1.824	1.831	1.791
Total	3.006	3.003	3.009	2.999

b.d.: below detection limit.

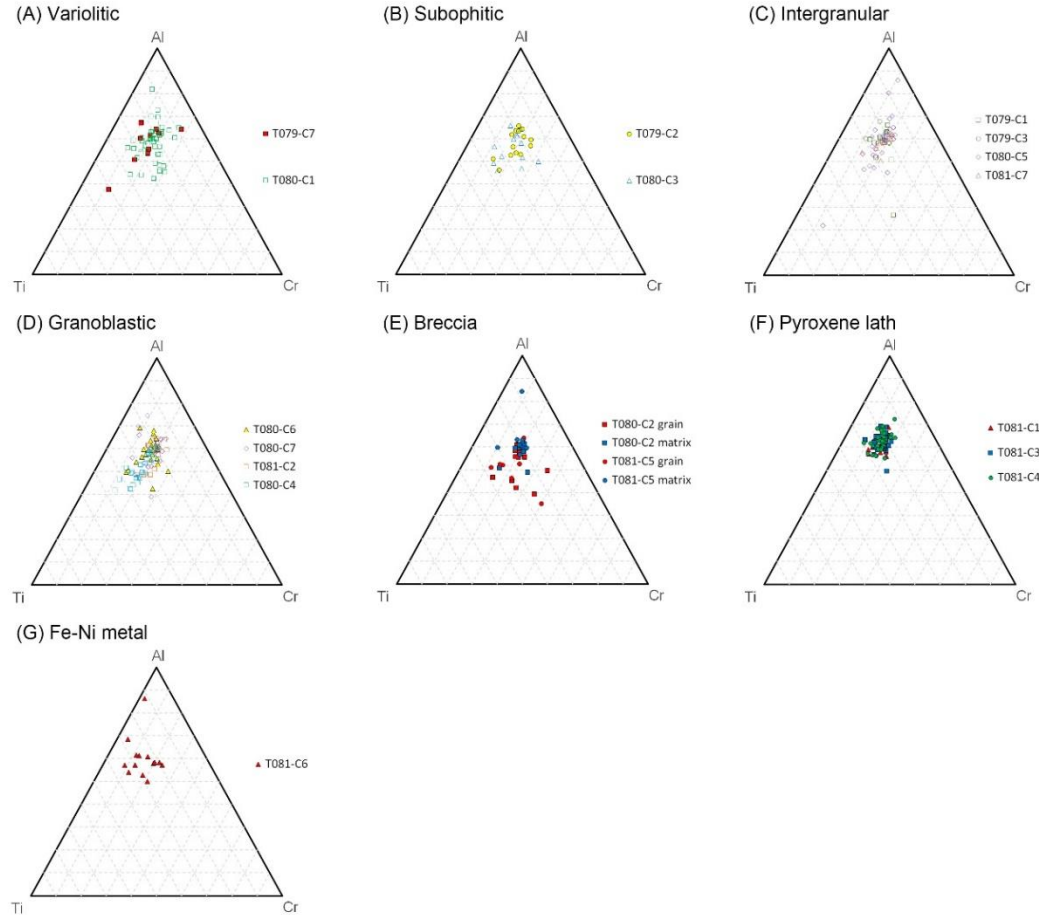




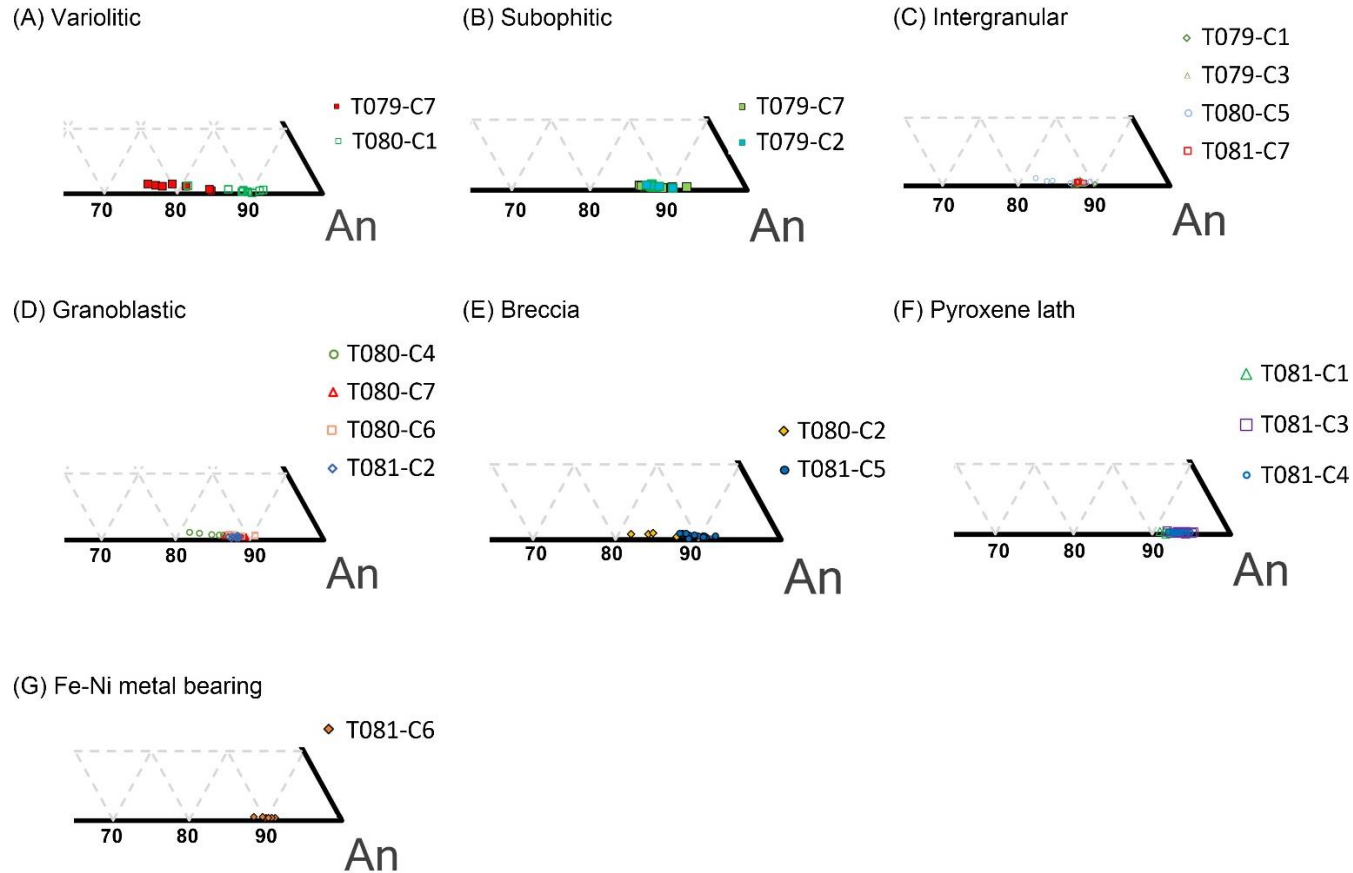
**Figure 4.24.** Pyroxene compositions of various textural groups. (A) variolitic clast, (B) subophitic clast, (C) intergranular clast, (D) granoblastic clast, (E) breccia clast, (F) pyroxene lath clast, and (G) Fe-Ni metal bearing clast. The pyroxene composition of most types (except fine-grained granoblastic clast and pyroxene lath clast) shows inter-clast homogeneity. The intermediate Wo contents of variolitic clasts are due to Ca-Mg zoning, and that of other clasts are due to incomplete separation high-Ca pyroxene lamellas from low-Ca pyroxene host.



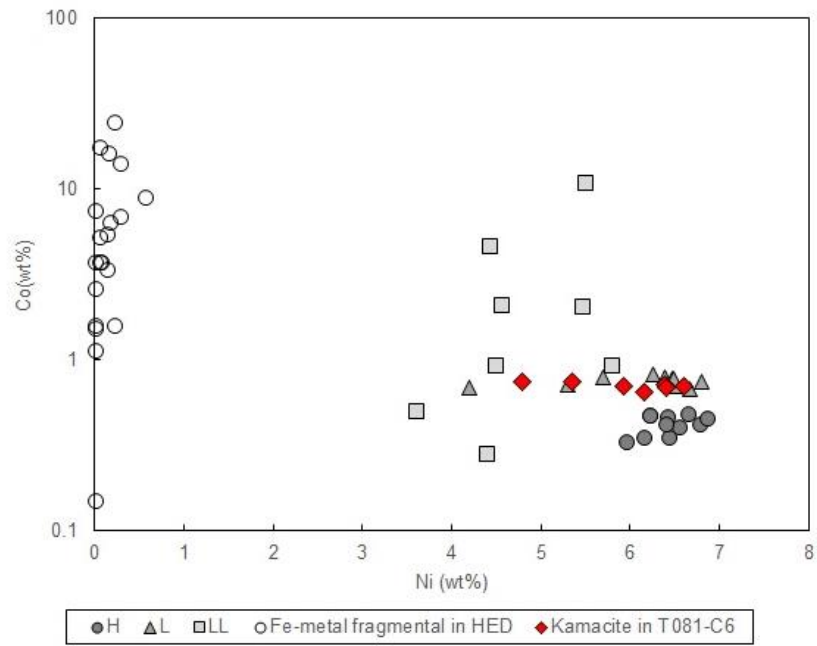
**Figure 4.25.** Pyroxene compositions of various textural groups. All data in Fig. 4.24 are plotted in one pyroxene quadrilateral. Pyroxene grains of lath type clast and of fine-grained granoblastic type clast are clearly distinguished from the other types of clasts.



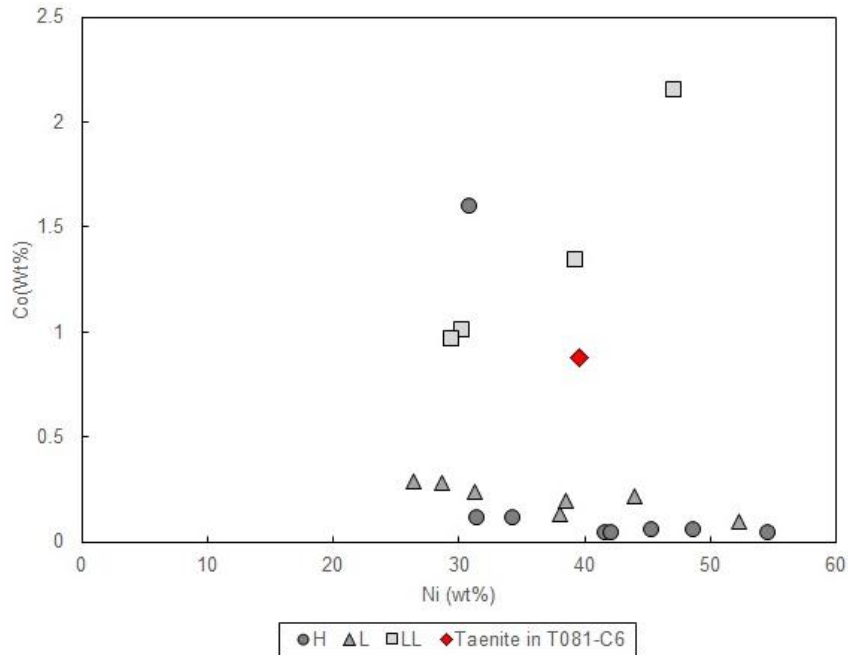
**Figure 4.26.** Al-Cr-Ti ternary diagrams of pyroxenes in the clasts studied. (A) variolitic clasts, (B) subophitic clast, (C) intergranular clast, (D) granoblastic clast, (E) breccia clast, (F) pyroxene lath clast, and (G) Fe-Ni metal bearing clast. The most clasts show equilibrated composition and cluster in the diagram. The composition of pyroxene lath is highly equilibrated. Some types (variolitic, intergranular, and granoblastic type) have Al-Ti variation.



**Figure 4.27.** An contents of plagioclase in the clasts studied. (A) variolitic clasts, (B) subophitic clast, (C) intergranular clast, (D) granoblastic clast, (E) breccia clast, (F) pyroxene lath clast, and (G) Fe-Ni metal bearing clast. The plagioclase composition of subophitic clasts, medium-grained granoblastic clasts, Fe-Ni metal bearing clasts, and intergranular clasts (except T080-C5 clast) are equilibrated at An contents from 85.9 to 92.1. The plagioclase composition of variolitic clast, fine-grained granoblastic clast(T080-C4) and T080-C5 clast show broad range composition and low An content (81.4-89.5). The plagioclase composition of pyroxene lath clasts is high An contents (90.8-95.1).



**Figure 4.28.** Ni versus Co compositions in kamacite of T081-C6 clast, measured with EMPA. The compositions fall in the range occupied by those in metals of ordinary chondrites (Afiattalab and Wasson, 1979). Non-chondritic metals are also found in meteorites of HED group: they are known as products of reduction process and thus nearly Ni-free (Gooley and Moore, 1976; Warren *et al.*, 2017; Ikeda and Takeda, 1985).



**Figure 4.29.** Co and Ni compositions of a taenite grain found in T081-C6 clast, measured with EMPA. The composition falls in the areas occupied by taenite grains in ordinary chondrites (Afiattalab and Wasson, 1979).

### 4.3 암편의 모드 조성

18개 암편에 대해 모드 분석을 실시하였다 (Table 4.9). 기존 연구에서 모드 비가 보고된 유크라이트의 광물 함량 비는 일반적으로 실리카 동질이상체가 3 vol.% 이하이며, 사장석은 40 vol.% ~ 60 vol.% 이다 (Fig. 4.30). 본 연구에서 관찰한 18개 암편 중 대부분이 현무암질 유크라이트에 해당되는 조직 및 광물 화학 조성을 나타내며 T079-C7만 전형적인 유크라이트의 광물 함량 비에 해당한다. 이러한 결과는 나머지 암편들이 광물 함량 비에 대한 대표성을 갖추지 못하기 때문이다. 모드 분석에서 분석 영역이 암석 또는 암편의 광물 함량 비에 대한 대표성을 갖기 위해서는 특정 광물이 결핍되거나 밀집되지 않아야 한다. 포아송 분포에 따라 분석 영역(암편의 면적)이 광물의 면적에 비해서 400배가량 크면 많은 수의 광물이 분석되어 통계학적으로 분석 결과에 대해 5%의 상대 오차를 갖고, 본 연구에서는 5%의 상대 오차라면 충분한 대표성을 지녔을 것으로 간주하였다. 구과상 조직 암편, 세립질 입상 변정질, 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편은 이와 같은 기준에 만족하나, 그 외 암편들의 모드 분석 결과는 분석 영역이 충분히 크지 않아 광물 함량 비에 대한 대표성을 신뢰하기 어렵다 (Table 4.2, Table 4.9). 각력암질 암편의 광물 함량 비는 암편을 구성하는 결정 파편 및 암석 파편들이 혼재되는 과정을 거쳤음으로 기원과는 무관하다.

막대 모양의 휘석으로 구성된 암편의 경우 암편을 구성하는 사장석과 휘석이 분리되어 층을 이루고 있어 모드 분석에서 분석 영역과 광물 크기에 상관없이 특정 광물이 우세하거나 결핍될 수 있다. 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편(T081-C1, T081-C3, T081-C4) 중 T081-C3와 T081-C4 암편은 휘석과 사장석이 모두 포함하는 T081-C1에서 각각 사장석과 휘석이 우세한 영역을 중심으로 떨어져 나온 암편처럼 보인다 (Table 4.9, Fig. 4.18). 따라서 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편 중 사장석과 휘석이 모두 나타나는 T081-C1 암편의 모드 분석 결과만 신뢰할 수 있으며, T081-C1 암편의 모드 분석 결과는 집적 유크라이트 중 빈다 유크라이트(Binda eucrite)와 유사하다 (Fig. 4.30)

**Table 4.9.** Modal abundances of the 18 clasts in TIL 07014 (vol. %).

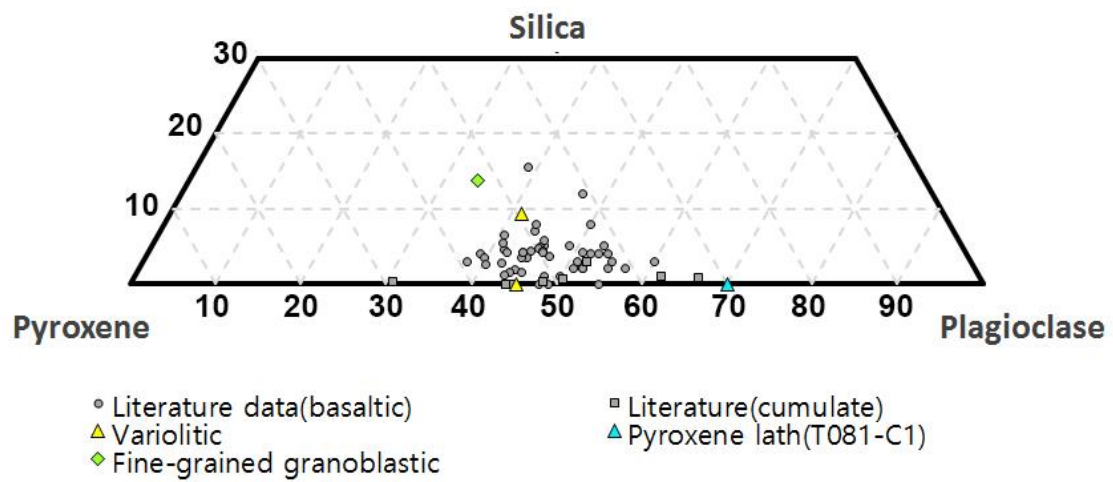
Clast name	Type	HCP	LCP	Pl	Silica	Fe-Ni metal	Chr	Il	Tr	Ca-P	Ol
T079-C7	Variolitic	24	30	45	-	-	1	-	trace	-	-
T080-C1	Variolitic	23	24	41	9	-	1	-	2	-	-
T079-C2	Subophitic	16	29	44	10	-	trace	-	trace	-	-
T080-C3	Subophitic	23	46	25	-	-	5	-	2	-	-
T079-C1	Intergranular	17	30	40	11	-	trace	trace	trace	-	-
T079-C3	Intergranular	6	13	30	49	-	3	-	trace	-	-
T080-C5	Intergranular	16	13	47	23	-	-	-	trace	-	-
T081-C7	Intergranular	25	36	38	-	-	1	-	-	-	-
T080-C4	Granoblastic (fine grained)	26	23	34	14	-	1	2	2	-	-
T080-C6	Granoblastic (medium grained)	15	22	54	9	-	trace	-	1	-	-
T080-C7	Granoblastic (medium grained)	23	35	13	28	-	2	-	1	-	-
T081-C2	Granoblastic (medium grained)	23	41	28	6	-	2	-	-	-	-

HCP= High Ca Pyroxene, LCP= Low Ca Pyroxene, Pl= Plagioclase, Chr=Chromite, Il=Ilmenite, Tr=Troilite, Ca-P= Ca-Phosphate, Ol= Olivine)

**Table 4.9.** Modal abundances of the 18 clasts in TIL 07014 (vol. %, continued)

Clast name	Type	HCP	LCP	Pl	Silica	Fe-Ni metal	Chr	Il	Tr	Ca-P	Ol
T080-C2	Breccia	16	34	37	11	-	1	1	-	-	-
T081-C5	Breccia	14	57	28	trace	trace	-	-	-	-	-
T081-C1	Pyroxene lath	7	22	70	-	-	trace	-	-	trace	-
T081-C3	Pyroxene lath	1	13	84	-	-	-	-	-	trace	2
T081-C4	Pyroxene lath	13	41	43	-	-	1	-	2	trace	-
T081-C6	Fe-Ni metal	10	46	37	-	5	1	trace	trace	-	-





**Figure 4.30.** Pyroxene-plagioclase-silica ternary diagram of modal abundance of clasts studied with previously measured eucrites from Mayne *et al.* (2009), Delaney *et al.* (1984), Yamaguchi *et al.* (2001), and Mittlefehldt. (2015). Variolitic type clasts fall the basaltic eucrite area, and fine-grained granoblastic clast falls high silica abundance area than typical eucrite. Pyroxene lath type clast (only T081-C1) falls high abundance of plagioclase like cumulate eucrites (Binda eucrite).

#### 4.4 암편의 전암 화학 조성

TIL 07014 내 암편을 기존에 보고된 스테너 그룹(Stannern group) 유크라이트, 메인 그룹(Main group) 유크라이트, 누에보 라레도(Nuevo Laredo group) 그룹 유크라이트 및 집적 유크라이트와 비교하기 위해서 암편들의 전암 화학 조성을 추정하였다. 암편의 전암 화학 조성은 암편의 전체 영역을 에너지 분산 X-선 분광 분석기(EDS)를 이용하여 반정량 분석하는 방법과 암편의 광물 함량 비를 광물의 화학조성을 곱하여 계산하는 방법으로 추정하였다 (Table 4.10~4.11). 두 가지 방법 모두 암편을 구성하는 광물의 함량 비에 따라 광물의 전암 화학 조성이 크게 변한다. 4.3에서 언급한대로 암편들 중 구과상 조직 암편, 세립질 입상 변정질 암편, 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편 중 T081-C1 암편을 제외한 암편의 광물 함량 비를 신뢰하기 어렵다. 따라서 여러 광물에 포함된 원소의 전암 화학 조성은 광물 함량 비에 영향을 받아 신뢰하기 어렵고 일반적으로 유크라이트의 분류에 사용하는  $TiO_2$  함량과  $Mg\#$  함량을 이용하는 방법을 사용할 수 없다.

$Na/Al$  (molar)과  $Mg\#$ 를 이용하여 유크라이트 종류를 구분이 되며  $FeO$ ,  $MgO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Na_2O$ 의 함량은 광물 함량 비와 광물 화학 조성으로 추정한 TIL 07014의 전암 화학 조성 분석 결과에서 신뢰할 수 있다 (e.g. Mittlefehldt, 2015). 그 이유는 해당 원소의 함량이 주구성 광물 중 특정 광물에 의해서 결정되기 때문이다.  $FeO$ 와  $MgO$  함량의 경우 주구성광물인 휘석에 9 wt.% ~ 17wt.%, 부구성 광물인 티탄 철석에 43 wt.% ~ 46 wt.%, 부구성 광물인 크롬 철석에는 34 wt.% ~ 41 wt.% 포함되어 있다. 암편에서 세 광물의 함량 비는 휘석은 20 vol.% ~ 60 vol.%, 티탄 철석은 2 vol.% 이하, 크롬 철석은 5 vol.% 이하 이며, 모든 암편에서 휘석의 광물 함량 비가 티탄 철석과 크롬 철석의 함량 비의 합보다 최소 10 배 이상이다. 따라서 전암 화학 조성에서  $FeO$ 와  $MgO$  함량 비는 휘석의 조성비에 따라 결정된다. 마찬가지로  $Al_2O_3$ ,  $Na_2O$  도 다른 광물에 비해서 사장석에서 함량 비가 월등히 높고 크롬 철석은  $Al_2O_3$ 을 약 7 wt.% 포함하나 함량 비가 <5 vol.%로 상대적으로 매우 적다. 따라서 전암 화학

조성에서  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 와  $\text{Na}_2\text{O}$  함량도 사장석의 조성비에 따라 결정된다.

TIL 07014 에서 관찰한 암편의 전암 화학 조성 중 신뢰할 수 있는  $\text{FeO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ 에 기반하여 암편을  $\text{Mg\#}$  와  $\text{Na/Al}$  (molar)의 도표에 도식하였다 (Fig. 4.31). 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편은 메인 그룹 현무암질 유크라이트와 집적 유크라이트의 경계에 위치하고, 세립질 입상 변정질 암편(T080-C4)과 구과상 조직 암편 중 T079-C7 암편은 각각 누에보 라레도 그룹, 스테넨 그룹의 현무암질 유크라이트에 해당한다. 그 외 암편은 메인 그룹의 현무암질 유크라이트 영역에 도식된다. 박창근 (2009)에서는 TIL 07014는 집적 유크라이트의 암편과 메인 그룹-누에보 라레도 경향의 현무암질 유크라이트로 구성되는 것으로 보고되었고 스테넨 그룹의 현무암질 유크라이트 기원의 암편에 대해서는 보고되지 않았다. 또한, 전암 조성이 메인 그룹 현무암질 유크라이트에 해당되는 입간 조직 암편 중 T079-C1 암편은 집적 유크라이트의 전암 희토류 원소 함량 경향성을 나타낸다.

**Table 4.10.** Bulk composition of clasts analyzed by EDS (wt.%)

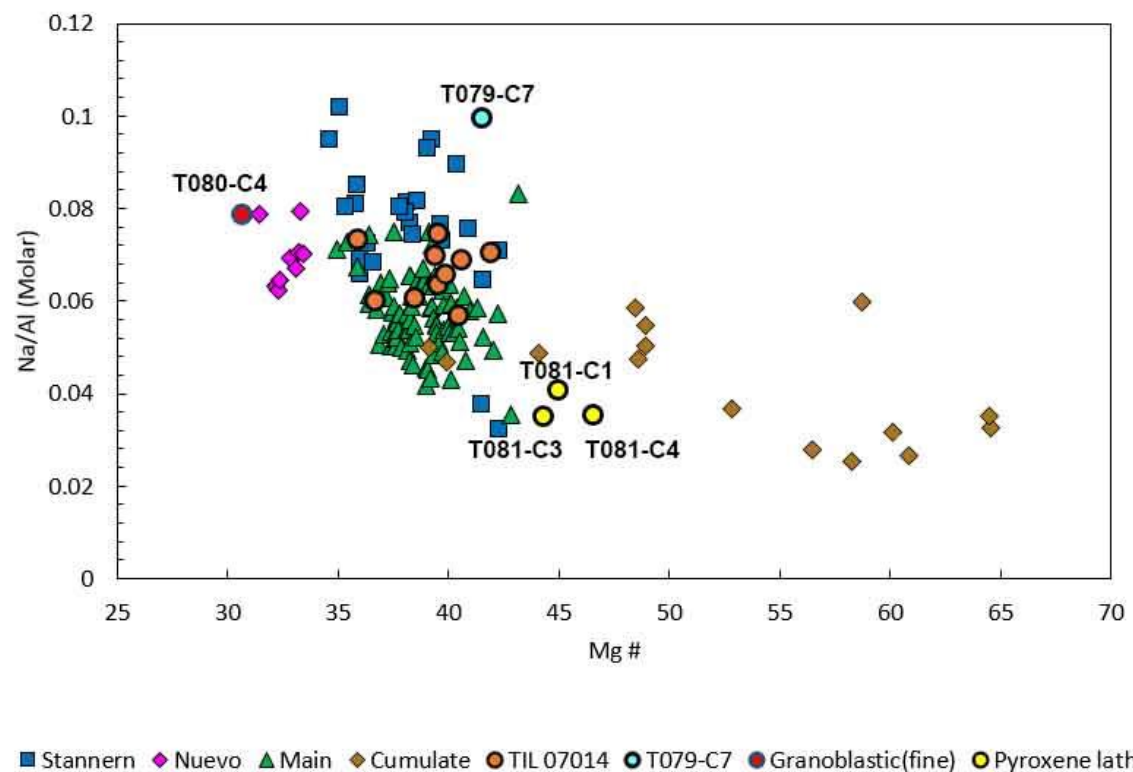
	Type	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Total
T079-C7	Variolitic	49	1	15	b.d.	17	1	6	11	1	b.d.	100
T080-C1	Variolitic	51	1	14	b.d.	16	b.d.	5	11	1	b.d.	99
T079-C2	Subophitic	56	b.d.	16	b.d.	12	b.d.	4	11	1	b.d.	100
T080-C3	Subophitic	49	1	14	b.d.	19	1	6	11	1	b.d.	100
T079-C1	Intergranular	51	1	14	b.d.	17	b.d.	5	10	1	b.d.	99
T079-C3	Intergranular	71	1	11	1	7	b.d.	2	7	1	b.d.	100
T080-C5	Intergranular	59	1	16	b.d.	10	b.d.	3	10	1	b.d.	99
T080-C4	Granoblastic (fine grained)	53	1	10	b.d.	18	b.d.	3	9	b.d.	b.d.	96
T080-C6	Granoblastic (medium grained)	54	b.d..	17	b.d.	12	1	4	11	1	b.d.	99
T080-C7	Granoblastic (medium grained)	56	b.d.	20	b.d.	9	b.d.	2	12	1	b.d.	100
T081-C2	Granoblastic (medium grained)	51	1	12	b.d.	20	1	6	10	b.d.	b.d.	100
T081-C1	Pyroxene lath	48	b.d.	24	b.d.	11	b.d.	4	14	1	-b.d	100
T081-C3	Pyroxene lath	46	b.d.	31	b.d.	4	b.d.	1	18	1	b.d.	100
T081-C4	Pyroxene lath	49	b.d.	14	b.d.	18	b.d.	8	9	0	b.d.	100
T081-C6	Fe-Ni metal	45	b.d.	11	b.d.	29	1	6	7	0	b.d.	100

b.d. : below detection limit

**Table 4.11.** Calculated bulk composition of clasts from mineral composition measure with EPMA and modal analysis data (wt.%).

	Type	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Total
T079-C7	Variolitic	49	b.d.	17	b.d.	13	b.d.	5	13	1	b.d.	99
T080-C1	Variolitic	53	b.d.	14	b.d.	14	b.d.	5	12	b.d.	b.d.	98
T079-C2	Subophitic	54	b.d.	17	b.d.	12	b.d.	4	12	1	b.d.	99
T080-C3	Subophitic	47	b.d.	11	2	22	1	7	10	b.d.	b.d.	99
T079-C1	Intergranular	54	b.d.	15	b.d.	12	b.d.	5	11	1	b.d.	99
T079-C3	Intergranular	74	b.d.	11	1	5	b.d.	2	7	b.d.	b.d.	99
T080-C5	Intergranular	61	b.d.	17	b.d.	6	b.d.	3	12	1	b.d.	99
T081-C7	Intergranular	48	b.d.	15	b.d.	16	b.d.	6	13	1	b.d.	98
T080-C4	Granoblastic (fine grained)	55	1	13	b.d.	15	b.d.	4	11	1	b.d.	99
T080-C6	Granoblastic (medium grained)	52	b.d.	20	b.d.	9	b.d.	3	13	1	b.d.	99
T080-C7	Granoblastic (medium grained)	65	b.d.	5	1	15	b.d.	6	7	b.d.	b.d.	99
T081-C2	Granoblastic (medium grained)	52	b.d.	12	1	17	1	6	11	b.d.	b.d.	99
T081-C1	Pyroxene lath	47	b.d.	27	b.d.	7	b.d.	3	16	1	b.d.	100
T081-C3	Pyroxene lath	45	b.d.	31	b.d.	4	b.d.	2	17	1	b.d.	100
T081-C4	Pyroxene lath	47	b.d.	18	b.d.	14	b.d.	7	12	b.d.	b.d.	98
T081-C6	Fe-Ni metal	47	b.d.	16	b.d.	18	1	6	10	b.d.	b.d.	97

b.d. : below detection limit



**Figure 4.31.** Na/Al (molar) versus Mg# for calculated bulk compositions of clasts in TIL 07014 with previously measured eucrites from Mittlefehldt (2015). Most clasts in this study are similar with the main group eucrites, while T079-C7 clast falls near the Stannern group area and T080-C4 clast falls near the Nuevo Laredo group area. Pyroxene lath

## 제 5 장 논의(Discussion)

### 5.1 TIL 07014 내 암편의 기원 및 성인

#### 5.1.1 현무암질 유크라이트 기원 암편

구과상 조직 암편, 준오피틱 암편, 입간 조직 암편, 중립질 입상 변정질 암편, 각력암질 암편의 휘석(Ca 함량이 낮은 휘석:  $Wo_{2-5}En_{33-38}$ , Ca 함량이 높은 휘석:  $Wo_{40-44}En_{29-32}$ )과 사장석의 조성( $An_{75-92}$ )은 현무암질 유크라이트( $Wo_{<5}En_{29-45}$ ,  $Wo_{>40}En_{28-37}$ ,  $An_{75-91}$ , Mittlefehldt, 2015)의 조성에 속하며 해당 암편들의 조직은 현무암질 유크라이트 및 현무암질 유크라이트 기원 암편의 대표적인 조직들이다 (e.g. Bischoff *et al.*, 2006; Delaney *et al.*, 1984; Takeda *et al.*, 1983, 1991; Grossman *et al.*, 1981; Yamaguchi *et al.*, 2007; Fig. 4.24~4.25, Fig. 4.27, Table 4.3~4.5). 해당 암편의 광물의 함량 비와 광물의 화학적 조성으로 추정된 전암 화학 조성도 현무암질 유크라이트에 해당하므로 해당 암편들은 현무암질 유크라이트 기원으로 생각된다 (Table 4.11, Fig. 4.31).

현무암질 유크라이트 기원의 암편 중 구과상 조직 암편의 T079-C7 암편은 계산으로 구한 전암 화학 조성에서 스테넨 그룹에 해당하고 그 외 암편들은 메인 그룹에 해당한다 (Table 4.11, Fig. 4.31). TIL 07014의 선행 연구인 박창근 (2009)에서 보고한 현무암질 유크라이트 암편의 종류는 메인 그룹-누에보라레도 경향의 현무암질 유크라이트 뿐이었다. 따라서 T079-C7의 기원을 명확히 하고자 암편을 구성하는 휘석과 사장석 조성으로 기원을 다시 확인하였다. 사장석의 An 함량과 Ca 함량이 낮은 휘석의 En 함량에서 T079-C7 암편은 휘석의 En 함량이 36.7, 사장석의 An 함량이 81.1으로 메인 그룹-누에보라레도 경향의 유크라이트보다 사장석의 An 함량이 낮은 스테넨 경향의 유크라이트에 해당되어 비해 높다 (Fig. 5.1, Table 4.4~4.5, e.g. Delaney *et al.*, 1981). 따라서 현무암질 기원의 암편은 대부분이 메인 그룹에 해당되고 T079-C7 암편은 스테넨 그룹에 해당된다.

### 5.1.2 세립질 입상 변정질 암편

세립질 입상 변정질 암편은 세립질 현무암질 유크라이트 또는 충격 용융 액(impact melt)에서 기원한 것으로 알려져 있다 (e.g. Llorca *et al.*, 2009; Patzer *et al.*, 2003; Yamaguchi *et al.*, 1996, 1997). TIL 07014의 세립질 입상 변정질 암편에서 Ca 함량이 낮은 휘석의 조성은  $Wo_{2.0-4.4}En_{27.7-29.0}$ 으로 철 함량이 높아 일반적인 현무암질 유크라이트의 휘석의 조성( $Wo_{<5}En_{29-45}$ ,  $Wo_{>40}En_{28-37}$ , Mayne *et al.*, 2009; Mittlefehldt, 2015)에서 벗어난다 (Fig. 4.24D, Fig. 4.25). 또한 후기 정출 광물인 실리카 동질이상체가 자형 또는 반자형으로 산출되고, 트로일라이트, Ca-인회석과 인접하여 산출되며, 해당 광물들의 함량비도 일반적인 현무암질 유크라이트에 비해 높다 (Table 4.9, Fig. 4.13, Fig. 4.30). 따라서 세립질 입상 변정질 암편의 광물 화학 조성과 조직은 세립질 현무암질 유크라이트 기원으로 보기 어렵다

세립질 입상 변정질 암편은 다각형 조직 등의 재결정 조직이 나타날 만큼 높은 수준의 열 변성을 받았으나 휘석의 용리 조직과 클라우딩 조직이 미약하다 (Fig. 4.12~13, Fig. 4.14B). 이미 정출된 휘석은 변성 작용을 받는 동안 휘석 내  $Cr_2O_3$ ,  $TiO_2$ 가 크롬 철석(chromite) 및 티탄 철석(ilmenite)이 작은 크기의 결정으로 산출되어 클라우딩 조직을 이루고, 용리 조직은 피저나이트(pigeonite) 또는 사방 휘석(orthopyroxene)에서 안정상(stable phase)인 사방 휘석 또는 단사 휘석(clinopyroxene)등으로 용리되어 용리 조직을 형성한다 (e.g. Harlow and Klimentidis, 1980, Ishii and Takeda, 1974). 따라서 세립질 입상 변정질 암편이 이미 결정화된 현무암질 유크라이트에서 기원했다면 두 조직이 뚜렷해야 하나 그렇지 않다. 또한, 해당 암편의 휘석의 부원소 함량 및 사장석의 조성도 평형화된 정도가 작다. 따라서 열 변성 작용을 지시하는 조직과 화학 조성의 평형화 정도가 낮은 점 등에 따라 세립질 입상 변정질 암편이 현무암질 유크라이트로 기원으로 보기 어렵다 (Fig. 4.26, Fig. 4.27).

세립질 입상 변정질의 조직, 광물 화학 조성, 열 변성 조직 등을 바탕으로 세립질 입상 변정질 암편은 현무암질 유크라이트가 충격 작용을 받아 부분 용융된 충격 용융



액(impact melt)으로부터 기원하였을 것으로 생각된다. 부분 용융을 과정을 거쳐 생성된 충격 용융 액은 철 함량이 높고 분화된 마그마 조성 나타내므로 세립질 입상 변정질 암편의 광물 화학 조성 및 후기 정출 광물의 산출 양상 및 광물 비를 설명할 수 있다. 암편은 변성 작용을 받는 동안 부분 재결정화가 이루어져 세립질 입상 변정질 암편에서 열 변성 작용을 지시하는 조직인 클라우딩 조직과 용리 조직이 뚜렷하지 않은 점이 설명이 된다. 따라서 TIL 07014 내 세립질 입상 변정질 충격 변성 과정의 부분 용융으로 생성된 충격 용융 액이 재결정 받은 것으로 생각 된다.

### 5.1.3 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편

막대 모양의 휘석으로 구성된 암편의 Ca 함량이 낮은 휘석 조성은 Mg#가 43.5~50.3로 다른 암편과 구분되며 집적 유크라이트와 현무암질 유크라이트의 조성 모두에 해당한다 (Fig. 4.25, Table 4.4). 사장석의 Ca 함량은 TIL 07014의 다른 암편에 비해 높은  $An_{90.8-95.1}$ 로 집적 유크라이트에 해당한다 (Fig.4.27, Table 4.5). 전암 화학 조성은 집적 유크라이트와 현무암질 유크라이트 경계에 해당한다 (Fig. 4.31, Table 4.11).

막대 모양의 휘석으로 구성된 암편의 광물 화학 조성 및 전암 화학 조성은 집적 유크라이트에 가까우나, 암편 내 막대 모양 또는 침상으로 산출되는 휘석 결정은 급랭 과정에서 산출되어 느린 냉각 속도에서 나타나는 심성암의 조직의 집적 유크라이트 기원으로 설명하기 어렵다 (Fig. 4.19B, Fig. 4.19E~F). 반대로 현무암질 유크라이트 기원으로 설명하기에는 집적 유크라이트에 가까운 사장석, 휘석 및 전암 화학 조성을 설명하기 어렵다. 따라서 해당 암편의 기원은 명확하게 파악되지 않으나 여러 특징이 나머지 암편과 구분되어 다른 기원 및 성인을 가졌을 것으로 생각된다.

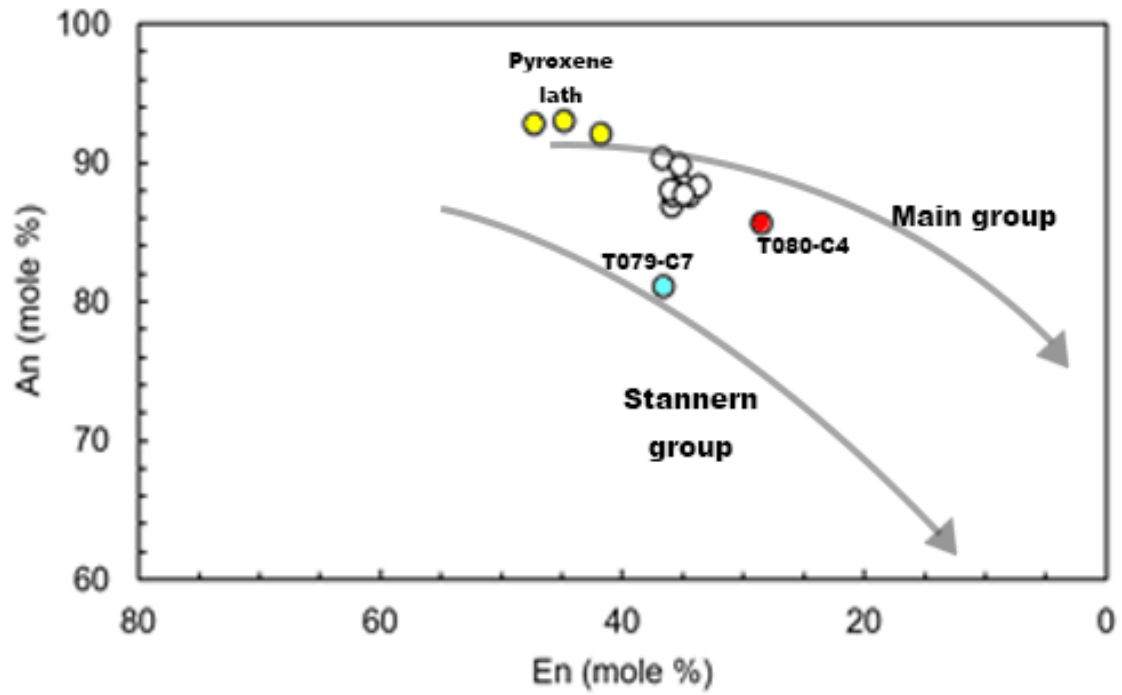
암편이 경험한 열 변성 정도는 휘석의 부원소 함량과 사장석의 조성까지 모두 평형화될 만큼 다른 암편에 비해서 높은 수준이며, 암편에서 후기 변질 과정으로 생성된 Ca-인회석과 Fe 함량이 높은 감람석( $Fa_{72.6-74.}$ )이 관찰된다 (Fig. 4.19D, Fig.

4.26~4.27). Fe 함량이 높은 감람석( $\text{Fa}_{64\sim 86}$ )은 모천체의 변질 작용을 통하여 생성될 수 있다 (Barrat *et al*, 2011). 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편에서 관찰되는 감람석은 그 조성이 일반적으로 디오제나이트에서 관찰되는 감람석의 조성에서 벗어나고 변질 작용으로 생성된 감람석 조성에 해당한다. 따라서 작은 크기로 결정들 경계에 위치하는 감람석은 후기 변질 광물인 Ca-인회석과 함께 해당 암편이 변질 작용을 받았음을 지시한다 (Fig. 4.19D, Fig. 4.19F). 평형화된 휘석의 부원소 함량과 후기 변질 광물은 TIL 07014의 다른 암편 및 기질부에서 관찰되지 않으므로 다른 암편들과 혼합 과정을 받기 전 형성 되었을 것이다.

#### 5.1.4 철-니켈 금속 철 함유 암편

철 니켈 금속 철 함유 암편인 T081-C6 암편에서 관찰되는 카마사이트(kamacite)와 테나이트(taenite)의 니켈(Ni) 및 코발트(Co)함량은 오디너리 콘드라이트(ordinary chondrite) 중 LL 또는 L 타입 오디너리 콘드라이트의 금속 철의 조성에 해당한다 (Fig. 4.29~4.30). 따라서 T081-C6 암편의 금속 철들은 모천체에 충돌한 LL 또는 L 타입의 오디너리 콘드라이트 충돌체에서 기원한 것으로 생각된다.

T081-C6 암편을 구성하는 휘석과 사장석의 조성은 현무암질 유크라이트에 해당되는 조성을 나타내고 휘석의 Fe/Mn (in molar)는 HED 중그룹에 속한다 (Table 4.3~4.5). 따라서 금속 철과 달리 T081-C6 암편을 구성하는 휘석과 사장석의 조성은 현무암질 유크라이트에 해당되므로, 해당 암편의 규산염 광물이 변성 작용 동안 주변의 현무암질 유크라이트와 화학적인 평형이 이루어진 것으로 의심된다. 철-니켈 금속 철 함유 암편의 규산염 광물의 기원에 대해 명확하게 알기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.



**Figure 5.1.** An content of plagioclase versus vs En content of low-Ca pyroxene of clasts studied (Mittlefehldt., 2015). T079-C7 is plotted on the Stannern group eucrite trend, and other clasts fall near the main group trend.

## 5.2 T079-C1 암편의 전암 희토류 원소 함량에 대한 모델링

박창근 (2009)에서 보고된 T079-C1과 동일한 암편의 전암 화학 조성은 경희토류(LREE)의 결핍, 중희토류(HREE)의 부화와 양의 유로피움 이상( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 1.67$ ) 등의 특징을 갖는다 (Fig.5.2, e.g. Barrat *et al.*, 2000; Hsu and Coraz, 1996, 1997). 이는 전형적인 집적 유크라이트 해당되는 특징이나 T079-C1 암편의 광물 화학 조성 및 본 연구에서 계산한 전암 화학 조성은 현무암질 유크라이트에 해당한다 (Mayne *et al.*, 2009; McSween *et al.*, 2012; Mittlefehldt, 2015; Fig. 4.24~4.25, Fig. 4.27, Fig. 4.31 Fig. 5.1, Table 4.3~4.5, Table 4.11).

T079-C1 와 유사하게 집적 유크라이트의 전암 희토류 원소 함량과 현무암질 유크라이트의 휘석 조성이 동시에 나타나는 유크라이트로 Y-791195와 Elephant Moraine 90020(이하 EET 90020), North West Africa 2362 (이하 NWA 2362), Dar al Gani 945(이하 DaG 945) 등이 있다 (e.g. Mittlefehldt and Lindstorm, 1993; Yamaguchi *et al.*, 2009). 전자의 경우(e.g. Y-791195) 는 다른 집적 유크라이트에 비해 분화된 마그마 (e.g. 누에보 라레도 조성의 마그마)에서 결정화된 집적 유크라이트로 철 함량이 높은 광물 화학 조성을 설명한다. 후자의 경우(e.g. EET 90020, NWA 2362, DaG 945) 는 높은 수준의 변성 작용이 일어나는 동안 일부 현무암질 유크라이트에서 부분 용융이 발생하고 부분 용융으로 생성된 용액이 암석에서 빠져나간 것으로 설명한다. 이때 경희토류 원소 등과 같은 불호정성 원소(incompatible element)이 용액에 농집 되어 액과 함께 빠져나가 암석의 낮은 불호정 원소의 함량 및 전암 희토류 원소 함량의 특징을 설명한다.

이 장에서는 T079-C1 암편의 전암 희토류 원소 함량과 광물 화학 조성 간의 불일치성을 위의 두 가지 모델로 설명하고자 하였다. 이때 두 가지 모델은 전암 희토류 원소 함량과 광물 화학 조성 외에도 1) 사장석과 휘석의 결정들이 1mm 이상의 크기로 산출되는 점, 2) 실리카 동질이상체가 다른 유크라이트에 비해서 다량으로 산출되고, 간극 조직이 아닌 자형 내지 반자형 형태로 0.5mm 크기로 산출되는 점등의 T079-C1의 조직

및 구성 광물의 크기가 설명되는지 확인하였다.

### 5.2.1 분화된 마그마에서 기원한 경우

T079-C1 암편의 전암 회토류 원소 함량을 분화된 조성의 마그마에서 평형 결정화 과정(equilibrium crystallization)과 분별 결정화(fractional crystallization)으로 생성된 암석으로 재현하고자 하였다. 이때 모 마그마(parent magma)의 전암 회토류 원소 함량은 메인 그룹-누에보 라레도 경향의 현무암질 유크라이트는 가장 시원적인 유크라이트로 알려진 주비나스 유크라이트(Juvinas eucrite)부터 전암 회토류 원소 함량이 높아 분화된 마그마에 해당되는 라카가온 유크라이트(Lakagaon eucrite)까지 다양한 분화된 정도를 나타내는 메인 그룹-누에보 라레도 경향의 현무암질 유크라이트와 스테넨 경향의 현무암질 유크라이트로 스테넨 유크라이트(Stannern eucrite)의 조성을 이용하였다. 실리카 동질이상체가 반자형으로 약 12 vol.% 가량 산출되어 T079-C1과 유사한 조직을 나타내는 칼데라 유크라이트(Caldera eucrite)의 조성도 모 마그마 조성에 포함하였다. 유크라이트의 모드 분석 결과와 회토류 원소 함량은 Mittlefehldt. (2015), Delaney *et al.* (1984), Mayne *et al.* (2009) 을 인용하였고 원소들의 분배 계수는 Barrat *et al.* (2007) 에 정리된 것을 인용하였다.

분화된 마그마 조성을 포함하여 다양한 조성의 마그마가 평형 결정화를 거쳐 생성한 암석의 회토류 원소 함량으로 T079-C1 암편의 경회토류 원소 함량의 결핍과 양의 유로피움 이상은 재현 되나 중회토류 원소 함량이 부화된 특징은 재현되지 않는다 (Fig. 5.3A). 분별 결정화 과정으로는 T079-C1 암편의 경회토류 및 중회토류 원소 함량의 특징은 재현이 가능하나 동시에 T079-C1과 유사한 양의 유로피움 이상이 재현되지 않았다 (Fig. 5.3B).

분별 결정화 과정에서 T079-C1 암편의 전암 회토류 원소 함량의 특징(경회토류 원소의 결핍, 중회토류 원소의 부화, 양의 유로피움 이상)을 동시에 모두 재현하기 위해서는 1.5인 유로피움에 대한 사장석의 분배 계수가 0.2~0.3까지 감소해야한다. 사장석에 대한 유로피움의 분배 계수는 결정화 과정이 이루어지는 곳이 온도가 높을수



록 또는 산화 환경일수록 값이 감소한다 (Sun *et al.*, 1974). 사장석의 분배 계수가 0.2~0.3가 되기 위해서는 생성 환경 온도는 약 2000K 이상이거나,  $f_{O_2}=-9$  이상이어야 한다. 온도와 산화 정도 모두 극단적인 상황에 해당하며, 산화 정도의 경우 일반적인 HED 중그룹의 운석이 생성된 환경( $f_{O_2}=-14\sim-16$ )보다 훨씬 산화된 환경( $f_{O_2}=-9$ )에 해당되며, 이는 지구의 환경( $f_{O_2}=-7$ )에 더 가깝다 (e.g. Drake, 1975). 따라서 분화된 조성의 마그마가 단순히 결정화 과정만으로는 T079-C1 암편의 희토류 원소 함량을 완벽하게 재현하기 어렵다.

### 5.2.2 변성 작용에 의한 부분 용융 과정을 거친 경우

T079-C1 암편에서 높은 수준의 충격 변성과 열 변성 작용의 특징들이 관찰되어 Yamaguchi *et al.*(2009)이 제시한 모델을 이용하여 T079-C1 암편의 전암 희토류 원소 함량을 설명하고자 하였다 (Fig. 4.7A, Fig. 4.8A ~ 4.8C). 높은 변성 작용을 받는 동안 암석에서 부분 용융이 이루어지면 암석의 전암 희토류 원소 함량은 급격하게 변하나 광물의 조성과 조직은 크게 변하지 않는다. 따라서 기원암의 광물 화학 조성 및 조직은 T079-C1 암편과 유사해야하기 때문에 1.5mm~2mm 크기의 결정들로 구성되며 간극 조직을 나타내는 현무암질 유크라이트인 칼데라 유크라이트(Caldera eucrite), Percora Escarpment 91078 (이하 PCA 91078), Elephant Moraine 87520(이하 EET 87520), 처보니 커트 유크라이트 (Chervony kut eucrite) 등을 기원암(Source rock)으로 설정하였다.

그 결과, T079-C1 암편의 희토류 원소 함량 중 경희토류 원소 함량과 양의 유로피움 이상은 재현이 가능하나, 동시에 중희토류 원소 함량이 부화된 특징을 재현하기 어렵다 (Fig. 5.4). 유크라이트 중 T079-C1 암편의 결정 크기 및 광물 함량비가 다른 스테넨 유크라이트(Stannern eucrite)를 기원암으로 설정한 경우 T079-C1 암편과 유사한 희토류 원소 함량이 재현이 가능하였다. 따라서 메인 그룹에 속하며 중립질의 결정들로 구성되고 실리카 동질이상체가 함량이 많은 유크라이트 중 스테넨 유크라이

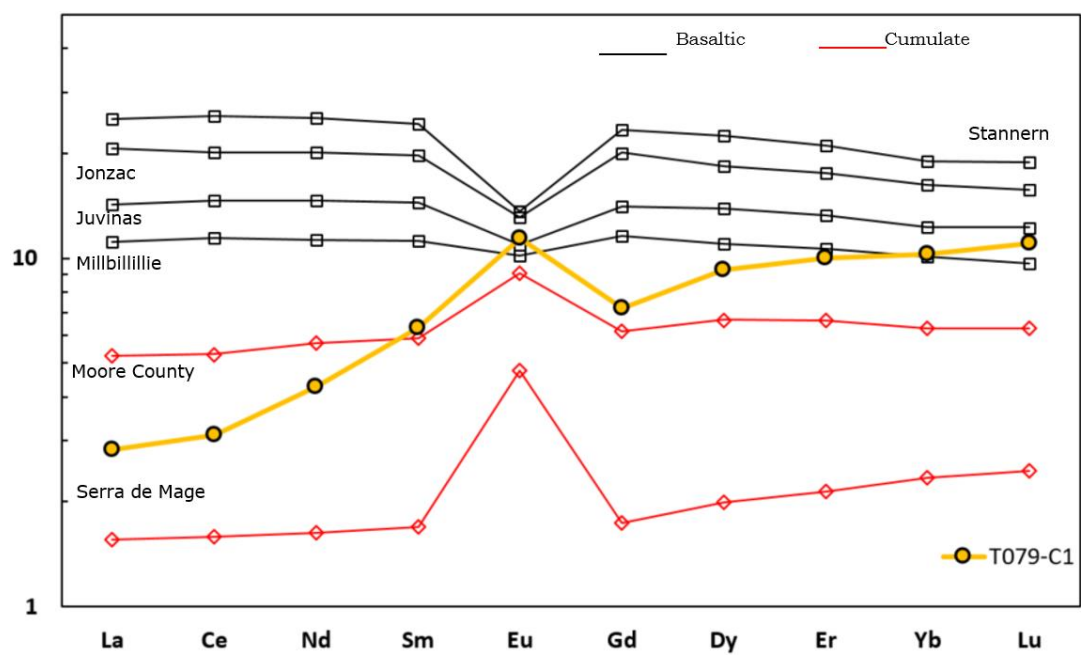
트만큼 희토류 원소 함량이 부화되고 중립질 입간 조직을 보이며 실리카 동질이상체가 많은 유크라이트를 기원암으로 설정하면 T079-C1 암편의 희토류 원소 함량, 조직, 광물 화학 조성, 전암 화학 조성 등을 설명할 수 있을 것이다.

### 5.2.3 부분 용융으로 생성된 마그마에서 결정화 되는 경우

기존의 T079-C1 암편과 유사하게 광물 화학 조성과 전암 희토류 원소 함량을 기존의 모델(e.g. Mittlefehldt and Lindstrom, 1993, Yamaguchi *et al.*, 2009)로는 T079-C1 암편의 희토류 원소 함량이 재현할 수 없었다. 따라서 새로운 모델을 적용하여 T079-C1 암편의 희토류 원소 함량을 설명하고자 하였다. T079-C1 암편은 실리카 동질이상체는 다른 유크라이트에 비해서 많아서 암편의 사장석, 휘석, 실리카 동질이상체의 함량 비 (사장석: 17 mol.%, 휘석: 68 mol.%, 실리카 동질이상체: 15 mol.%)는 사장석-휘석-실리카 동질이상체의 공용점에서의 함량 비(사장석: 16 mol.%, 휘석: 64 mol.%, 실리카 동질이상체: 20 mol.%, Stopler, 1977)와 유사하다 (Table. 4.9). 따라서 T079-C1 암편이 사장석, 휘석, 실리카 동질이상체로 이루어진 유크라이트가 부분 용융된 용액으로부터 생성되었을 것이다.

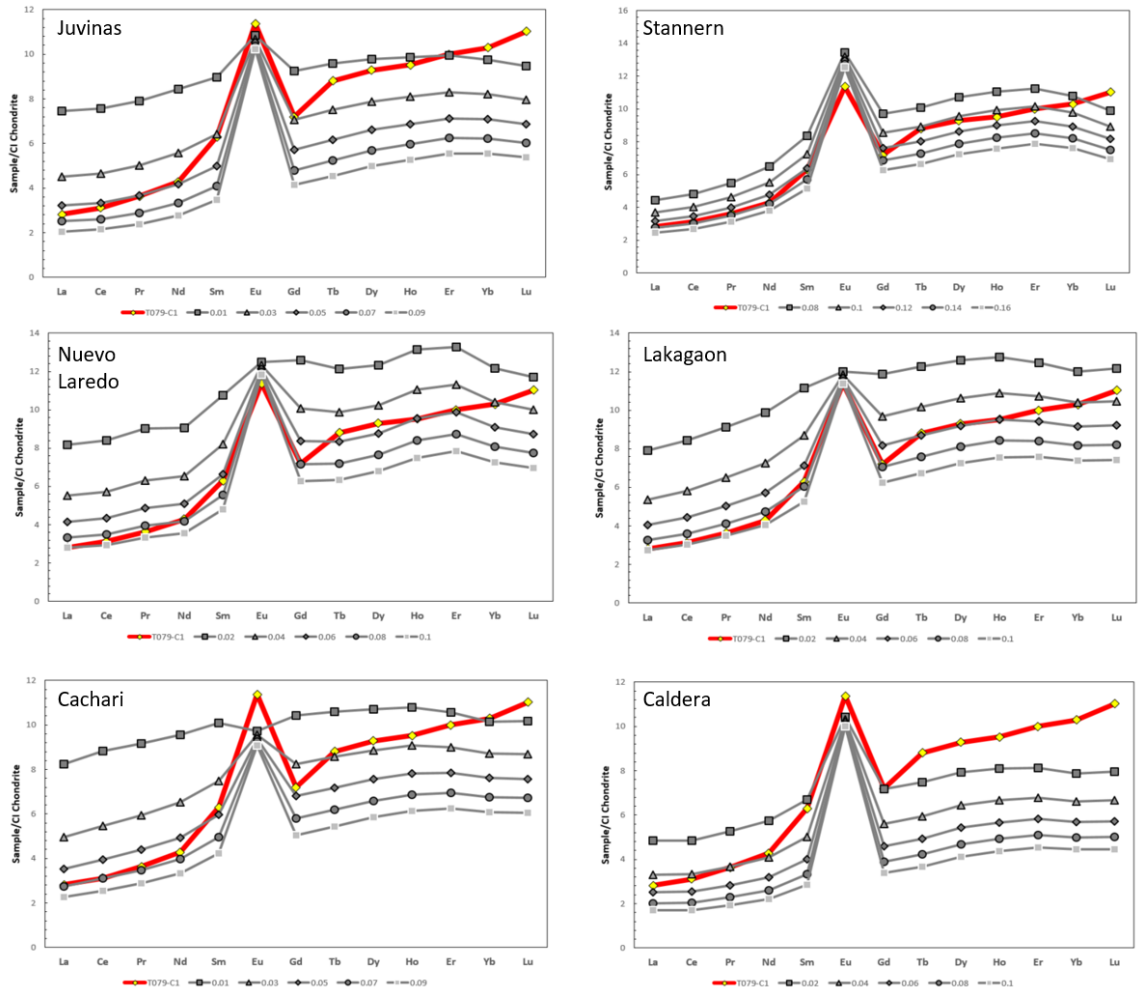
먼저 시원적인 유크라이트로 알려진 주비나스 유크라이트(Juvinas eucrite)를 부분 용융 시켜서 생성된 마그마의 전암 희토류 원소 함량을 T079-C1 암편의 희토류 원소 함량과 비교하였다. 단순한 부분 용융 과정으로는 T079-C1 암편의 희토류 원소의 함량을 재현할 수 없었다 (Fig. 5.5). T079-C1 암편의 희토류 원소의 함량의 특징인 경희토류 원소(LREE)가 결핍된 특징, 중희토류 원소(HREE)가 부화한 특징 양의 유로피움 이상의 특징들은 대략적으로 10~20% 정도의 주비나스 유크라이트 조성의 기원암이 부분 용융을 겪었을 때만 재현할 수 있다 (Fig. 5.6~5.7). 주비나스 유크라이트 조성의 기원암이 약 10%~20% 부분 용융되어 생성된 마그마를 85%~90% 정도 분별 결정화시켰을 때 T079-C1 암편의 희토류 원소 함량을 재현할 수 있었다 (Fig. 5.8).

쥬비나스 유크라이트 조성의 기원암은 부분 용융이 40% 이상을 넘어야 공용점을 벗어난다 (Stopler, 1977). 따라서 기원암을 10%~20% 정도 부분 용융 시켜서 만든 용액으로부터 결정화된 암석은 공용점과 유사한 광물 함량 비를 가지므로 T079-C1 암편의 실리카 동질이상체가 많은 광물 함량 비를 설명할 수 있다. 기원암이 부분 용융 되어 생성한 용액이 85%~90% 정도까지 분별 결정화 및 집적 과정이 이루어지는 동안 T079-C1 암편의 구성 광물처럼 1mm 내외의 큰 결정이 생성될 수 있다. 또한 10%~20% 부분 용융 과정이 이루어지는 동안 용액 내 철 함량은 기원암에 비해서 증가한다. 따라서 T079-C1의 Ca 함량이 낮은 휘석이 Mg# 35.4~36.7로 기원암인 쥬비나스 유크라이트 (Mg# 45.8) 보다 낮고 집적 과정을 거쳐 큰 결정들로 구성되는 조직을 나타내도 현무암질 유크라이트에 속하는 것을 설명할 수 있다.



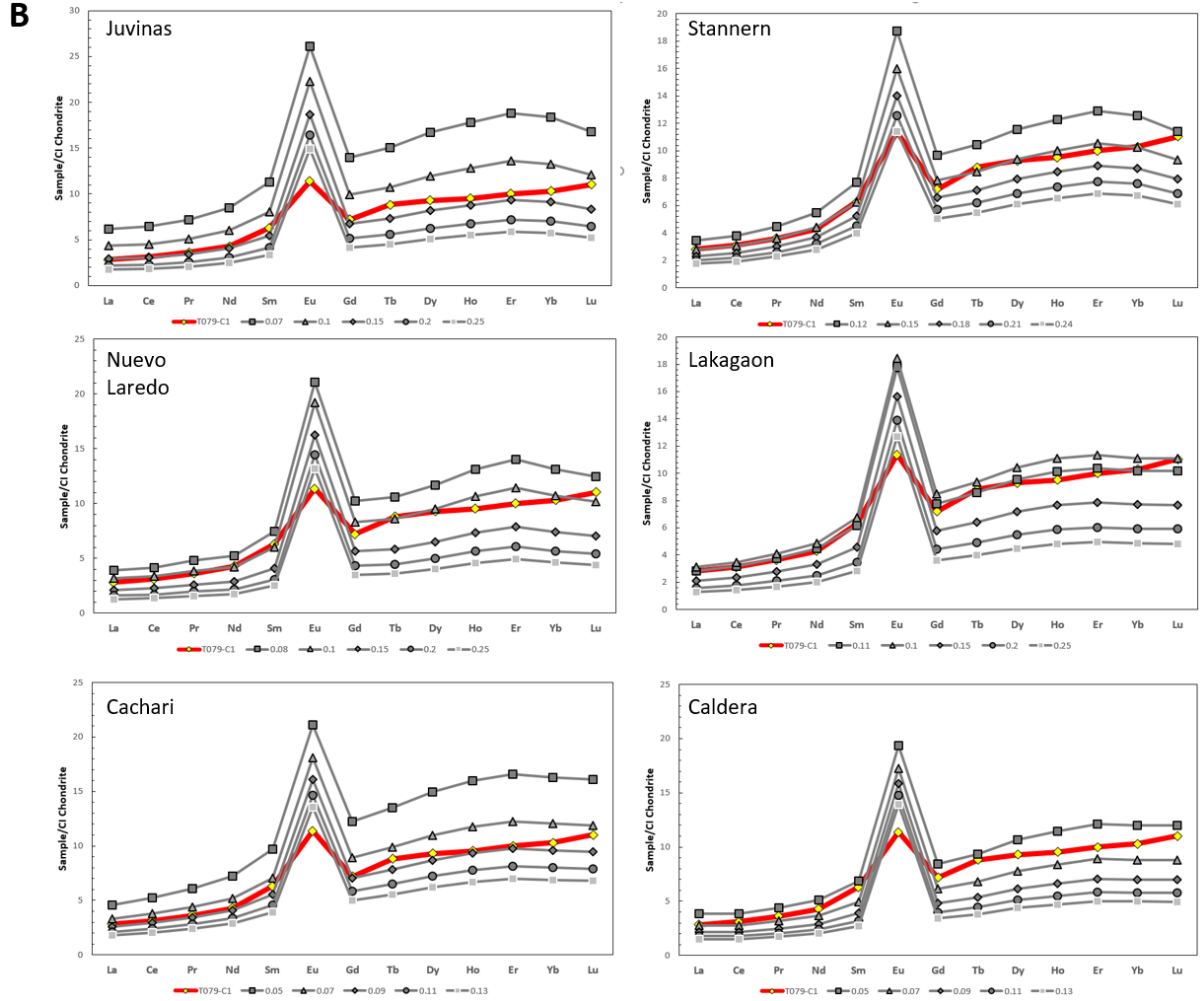
**Figure 5.2.** CI chondrite-normalized rare earth elements(REE) abundance of T079-C1 clast measured from Park. (2009) with basaltic and cumulate eucrites previous measured from Barrat *et al.* (2000). REE pattern of T079-C1 correspond to cumulate eucrite. The reference rare earth element value in chondrite is from Evensen *et al.* (1978).

A

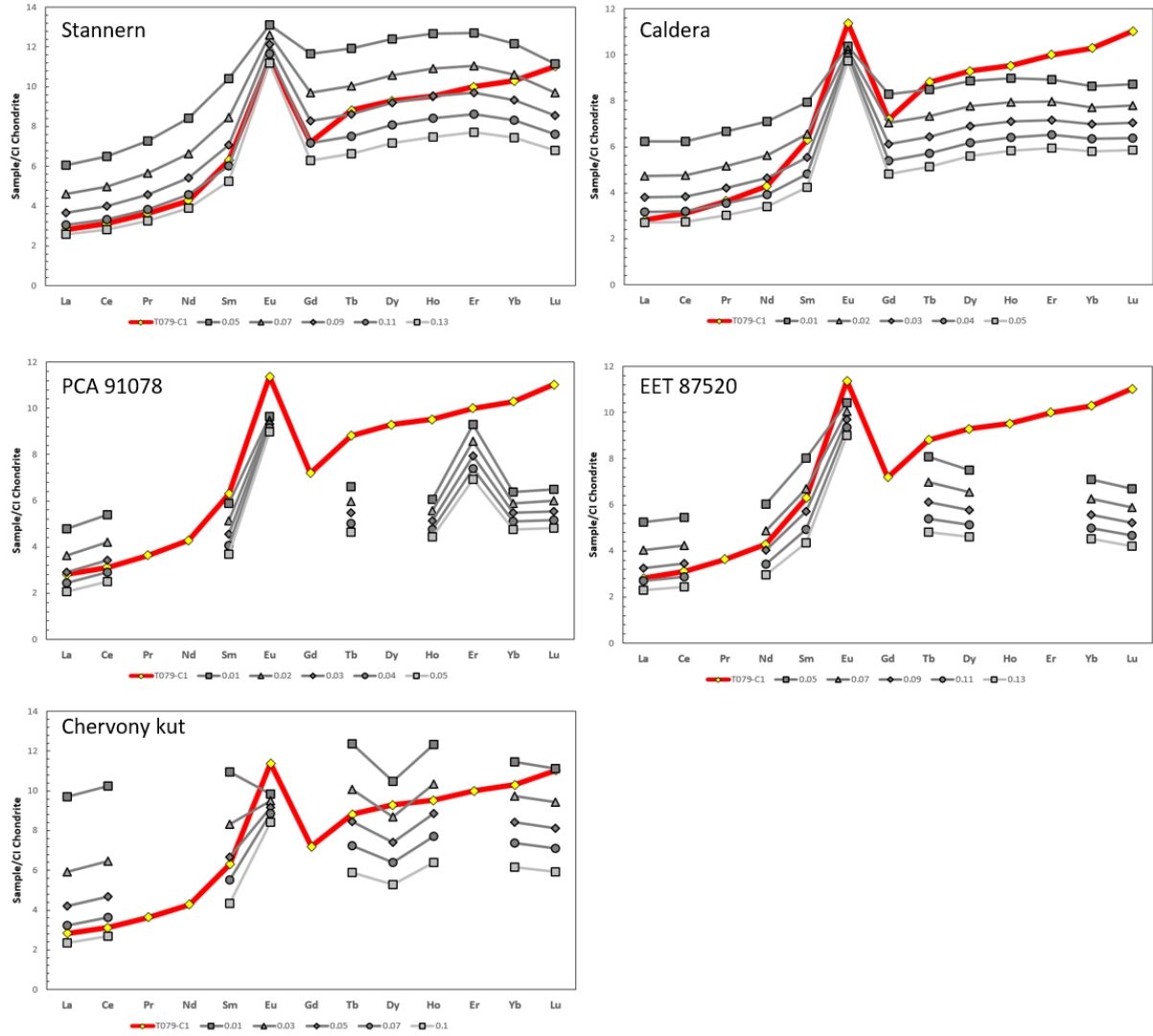


**Figure 5.3.** The CI-normalized REE abundance of T079-C1 clast (red line) and calculated REE abundances (black and grey lines) of rock crystallized from various magma with equilibrium crystallization(A) or fractional crystallization(B). Data of are from Park. (2009) for T079-C1 clast (red line) and Barrat *et al.* (2000) for source rock composition. Calculated rare earth elements abundances (black and grey lines) of solid from crystallization. (A) LREE depleted and Eu anomaly features of T079-C1 can be reproduced from equilibrium crystallization, but HREE is not. (B) LREE depleted and HREE enriched features of T079-C1 can be reproduced by fractional crystallization, but Eu anomaly is not. The reference chondrite is from Evensen *et al.* (1978). Partition coefficients for modeling from Brenan *et al.* (1998), Herd *et al.* (2004), Norman *et al.* (2005), Schwandt and McKay (1998), Phinney and Morrison (1990), Jones (1995), Righter and Shearer. (2003), Barrat *et al.* (2007).

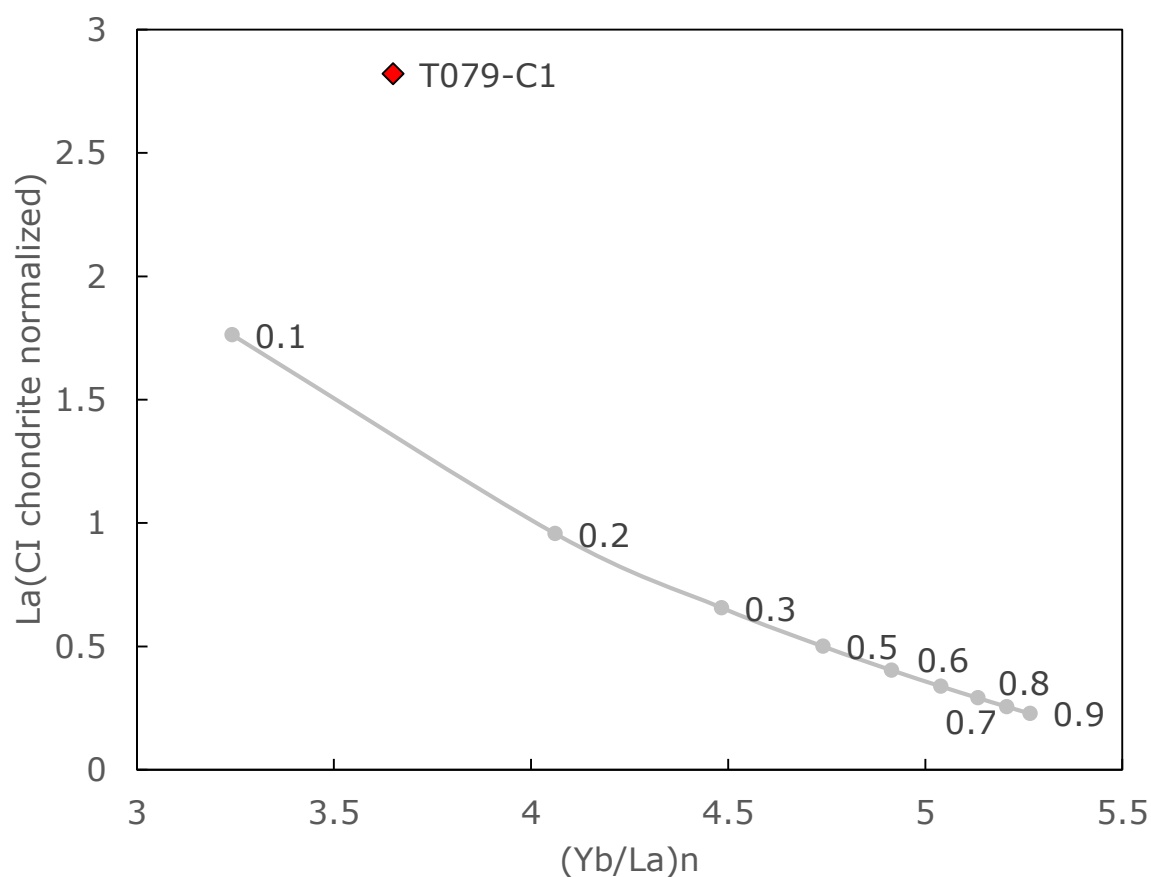




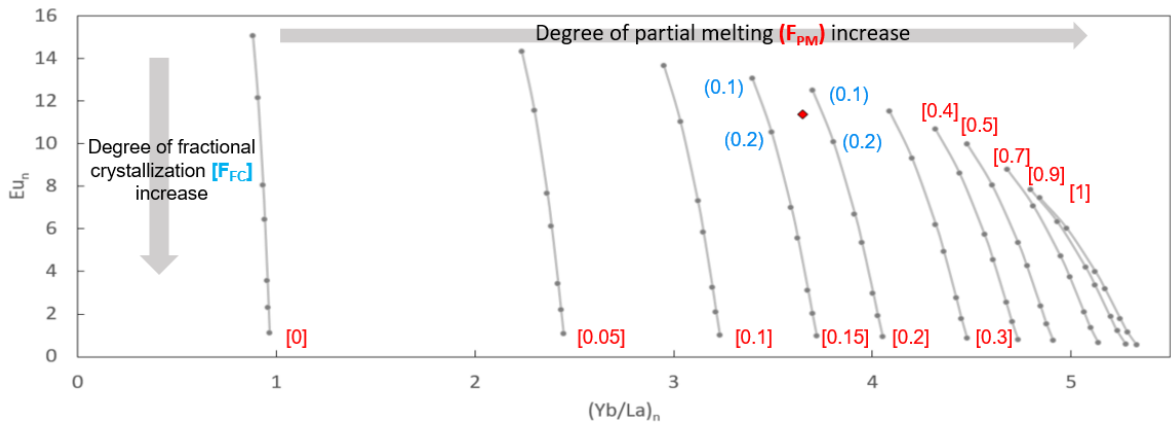
**Figure 5.3.** The CI-normalized REE abundance of T079-C1 clast (red line) and calculated REE abundances (black and grey lines) of rock crystallized from various magma with equilibrium crystallization(A) or fractional crystallization(B). Data of are from Park. (2009) for T079-C1 clast and Barrat *et al.* (2000) for source rock composition. Calculated rare earth elements abundances of solid from crystallization. (A) LREE depleted and Eu anomaly features of T079-C1 can be reproduced from equilibrium crystallization, but HREE is not. (B) LREE depleted and HREE enriched features of T079-C1 can be reproduced by fractional crystallization, but Eu anomaly is not. The reference chondrite is from Evensen *et al.* (1978). Partition coefficients for modeling from Brenan *et al.* (1998), Herd *et al.* (2004), Norman *et al.* (2005), Schwandt and McKay (1998), Phinney and Morrison (1990), Jones (1995), Righter and Shearer. (2003), Barrat *et al.* (2007)..



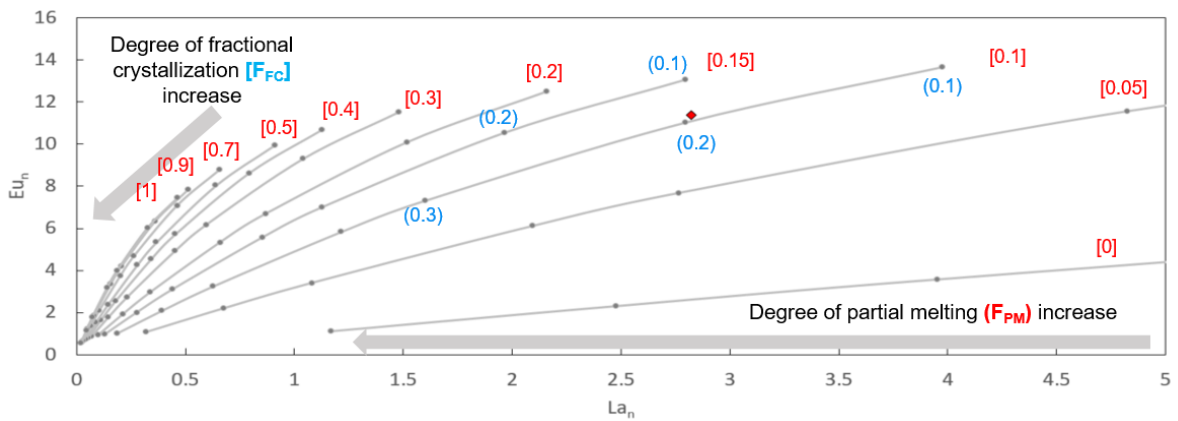
**Figure 5.4.** The CI-normalized REE abundance of T079-C1 (red line) and residual eucrites (black and grey lines) calculated from partial melting with the extraction of partial melt of various source rocks. The reference chondrite is from Evensen *et al.* (1978). Data are from Park. (2009) for T079-C1 clast and Barrat *et al.* (2000) and Mittlefehldt. (2015) for source rock composition. The products (except source rock is Stannern eucrites) of this model cannot reproduce HREE enriched feature of T079-C1. Partition coefficients for modeling from Brenan *et al.* (1998), Herd *et al.* (2004), Norman *et al.* (2005), Schwandt and McKay (1998), Phinney and Morrison (1990), Jones (1995), Righter and Shearer. (2003), Barrat *et al.* (2007).



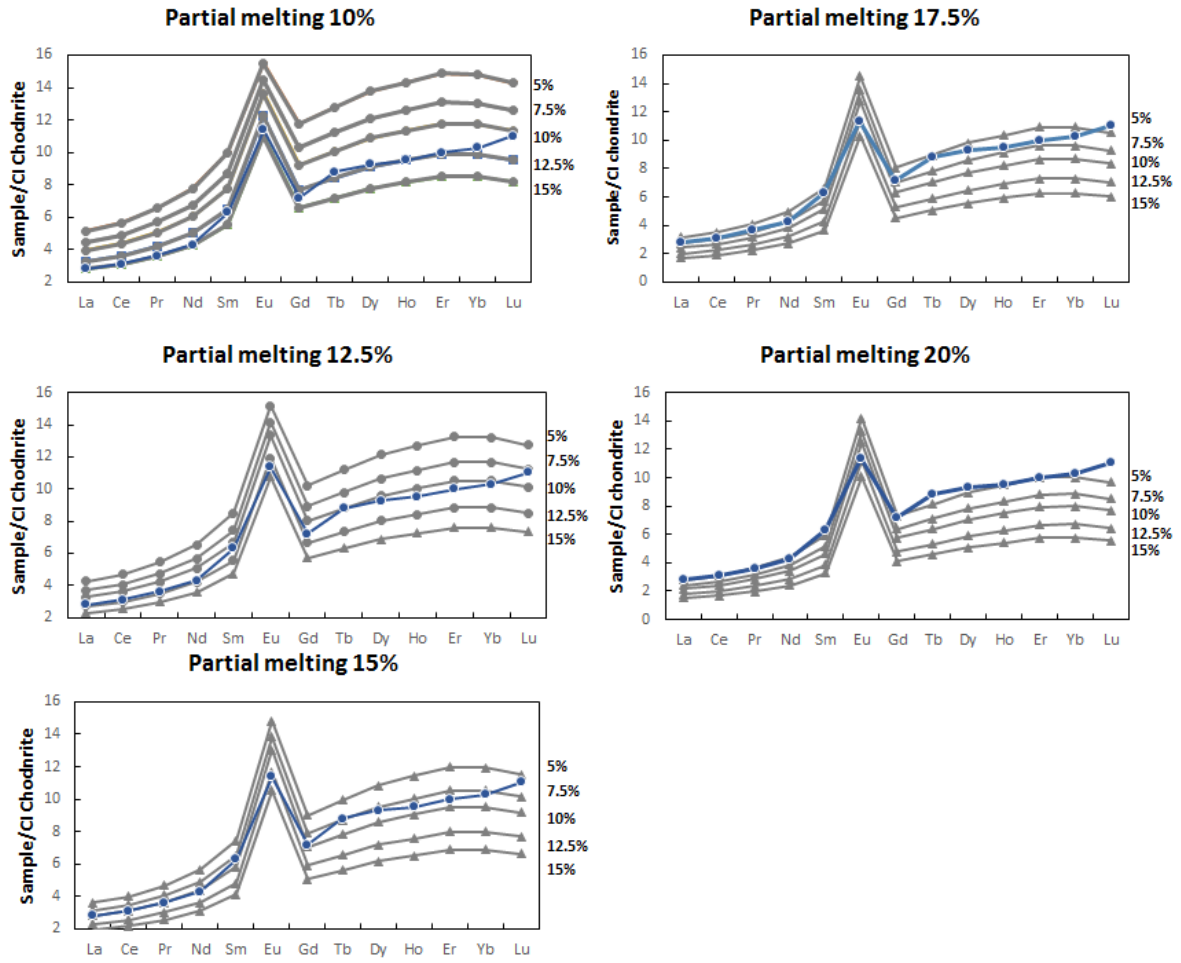
**Figure 5.5.** The CI-normalized La versus  $(Yb/La)_n$ . The grey line show La and  $(Yb/La)_n$  contents of part melt from source rock with Juvinas eucrites composition. Red point is La and  $(Yb/La)_n$  of T079-C1. Data are from Park. (2009) for T079-C1 clast and are from Barrat *et al.* (2000). Partition coefficients for modeling from Brenan *et al.* (1998), Herd *et al.* (2004), Norman *et al.* (2005), Schwandt and McKay (1998), Phinney and Morrison (1990), Jones (1995), Richter and Shearer. (2003), Barrat *et al.* (2007).



**Figure 5.6.** The CI-normalized Eu versus  $(Yb/La)_n$ . Grey lines are calculated data of partial melt from source rock with Juvinas eucrites composition. Red point is  $Eu_n$  and  $(Yb/La)_n$  of T079-C1. The REE pattern of T079-C1 is similar that of the solid from 10~20% fractional crystallized of melt from 15~20% partial melting from Juvinas eucrite. Data are from Park. (2009) for T079-C1 clast and are from Barrat *et al.* (2000). Partition coefficients for modeling from Brenan *et al.* (1998), Herd *et al.* (2004), Norman *et al.* (2005), Schwandt and McKay (1998), Phinney and Morrison (1990), Jones (1995), Righter and Shearer. (2003), Barrat *et al.* (2007).



**Figure 5.7.** The CI-normalized Eu versus  $La_n$ . As. Grey lines are calculated data of partial melt from source rock with Juvinas eucrites composition. Red point is  $Eu_n$  and  $(Yb/La)_n$  of T079-C1. The REE pattern of T079-C1 can be reproduced from 20% fractional crystallized of melt from 10% partial melting from Juvinas eucrite. Data are from Park. (2009) for T079-C1 clast and are from Barrat *et al.* (2000). Partition coefficients for modeling from Brenan *et al.* (1998), Herd *et al.* (2004), Norman *et al.* (2005), Schwandt and McKay (1998), Phinney and Morrison (1990), Jones (1995), Righter and Shearer. (2003), Barrat *et al.* (2007).



**Figure 5.8.** The CI-normalized REE patterns of solid composition from fractional crystallized of partial melt from Juvinas eucrite. The calculated pattern from 5~15% fractional crystallized the melt obtained after 10~20% partial melting are a close match to the REE pattern of T079-C1. Data are from Park. (2009) for T079-C1 clast and are from Barrat *et al.* (2000). Partition coefficients for modeling from Brenan *et al.* (1998), Herd *et al.* (2004), Norman *et al.* (2005), Schwandt and McKay (1998), Phinney and Morrison (1990), Jones (1995), Righter and Shearer. (2003), Barrat *et al.* (2007).



### 5.3 TIL 07014 의 각력화 및 혼합 과정

TIL 07014 의 SNU-T079, SNU-T080, SNU-T081 박편에서 기질부와 구분한 총 18 개 암편은 기원에 따라 메인 그룹-누에보라레도 경향의 현무암질 유크라이트 기원, 스테넨 경향의 현무암질 유크라이트, 충격 용융 액 기원, 콘드라이트 기원, 그리고 기원을 명확하게 알 수 없는 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편으로 나누어진다. 18 개 암편 중 12 개가 메인 그룹 현무암질 유크라이트에 해당한다. 따라서 TIL 07014 가 모천체에서 최종적으로 떨어져 나온 지역은 메인 그룹 현무암질 유크라이트가 우세하였을 것으로 생각된다.

메인 그룹 현무암질 유크라이트 기원 암편은 총 4.5 cm<sup>2</sup> 면적에 해당하는 3 개의 박편에서 구과상 조직의 암편부터 중립질 입상 변정질 암편까지 다양한 조직으로 나타난다. 메인 그룹 현무암질 유크라이트 기원의 암편들의 휘석의 조성은 균일한 조성으로 평형화되어 있어 모두 동일한 마그마에서 기원한 것으로 생각된다. 메인 그룹 현무암질 유크라이트 기원의 암편처럼 동일한 기원의 암편으로 구성된 모노믹트 유크라이트에서도 다양한 조직들이 관찰된다 (e.g. Millibillie, Stannern, Juvinas, Metzler *et al.*, 1995). 다양한 조직의 암편들로 구성된 모노믹트 유크라이트는 일반적으로 모천체에서 두껍게 분출한 용암에서 기원하여 용암의 상부부터 하부까지 넓은 냉각 속도에 따라 다양한 조직이 나타난 것으로 알려져 있다 (Metzler *et al.*, 1995, Yamaguchi *et al.*, 1994). 모천체의 표층에서는 냉각속도가 빨라 누대 구조가 우세하며, 메인 그룹 현무암질 유크라이트 기원의 암편처럼 다양한 조직의 암편들이 일정한 조성으로 평형화되기 어렵다. 따라서 메인 그룹 현무암질 유크라이트 기원의 암편들은 모천체의 표층보다 깊은 곳에서 열 변성 받아 균일한 조성으로 평형화되었을 것이다. 즉 TIL 07014 가 기원한 곳은 메인 그룹 현무암질 유크라이트 조성의 마그마가 두꺼운 용암체를 형성할 만큼 화성 활동이 활발하며, 다양한 깊이에서 생성되는 여러 조직의 암편들이 하나의 각력암에서 나타날 만큼 각력화 작용이 많이 이뤄진 곳이다.

TIL 07014 내 암편에서 높은 수준의 열 변성을 지시하는 중립질 입상 변정질 암편에서는 휘석의 용리 조직이 잘 발달되었으며, 입상 변정질 암편인 T080-C6 암편의 휘석 결정 중 일부에서 방향과 두께가 서로 다른 용리 엽리(exsolution lamella)가 관찰된다 (Fig. 4.9~4.10, Yamaguchi *et al.*, 2009).

휘석은 마그마의 조성에 따라 사방 휘석(orthopyroxene) 또는 피저나이트(pigeonite)로 정출되며, 용리 조직은 초기 조성과 냉각 속도에 따라서 결정된다 (Ishii and Takeda, 1974). 휘석에서 나타나는 용리 조직은 크게 부쉬벨드 타입(Bushveld type), 킨토키산 타입(Kintoki-san type), 스틸워터 타입(Stillwater type)으로 나누어 진다. 휘석의 용리 조직은 휘석의 조성에서 Mg#가 높은 경우는 부쉬벨드 타입에 해당 하고, Mg#가 낮은 경우는 스틸워터 타입에 해당 한다.

유크라이트를 구성하는 휘석에서는 스틸워터 타입의 용리 조직이 관찰된다 (Takeda, 1979). 스틸워터 타입(Stillwater type)은 휘석의 Mg#가 50~70 일 때 나타나며 마그마에서 먼저 피저나이트(pigeonite)로 정출되고 피저나이트와 단사 휘석(clinopyroxene)의 솔버스(solvus)의 온도에 도달하면 피저나이트에서 (001) 방향으로 단사 휘석이 용리 엽리로 나타난다. 이후 온도가 내려가면서 (001) 방향의 단사 휘석의 용리 엽리는 두꺼워지고 피저나이트는 저온에서 안정한 사방 휘석으로 변한다. 사방 휘석과 단사 휘석의 솔버스(solvus)의 온도에 도달하면 사방휘석에서 다시 단사 휘석이 (100) 방향으로 용리되어 나타난다. 최종적으로는 하나의 휘석 결정에서 (001) 방향의 두꺼운 용리 엽리와 (100) 방향의 얇은 용리 엽리가 나타나 서로 수직인 방향으로 배치된다 (Fig. 6b in Ishii and Takeda, (1974)). 스틸워터 타입(Stillwater type)의 휘석에서 서로 수직인 방향의 용리 엽리가 나타나기 위해서는 냉각 속도가 느려 충분한 시간 동안 변성 작용이 이루어지는데 필요한 충분한 시간이 있어야 한다. 따라서 유크라이트 중 느린 냉각 속도의 변성 작용을 받은 집적 유크라이트에서 서로 수직인 방향의 용리 엽리로 이루어진 용리 조직이 나타나는 것으로 알려져 있다.

T080-C6 암편은 현무암질 유크라이트 기원의 암편이나 집적 유크라이트에 해당하는 용리 조직이 나타난다 (Fig. 4.10B, Fig. 4.24~25, Fig. 4.31, Fig. 5.1). 따라서 해당 암편은 매우 느린 냉각 속도의 열 변성을 받아 집적 유크라이트와 유사한 열적 과정을 거쳤을 것으로 생각된다. 유크라이트의 모천체의 변성 과정은 계속되는 마그마의 분출로 지각의 두께가 두꺼워지면서 초기에 분출된 암석이 매몰되고 온도가 상승되어 이루어진다 (Yamaguchi *et al.*, 1996, 1997; Takeda, 1997). 현무암질 유크라이트 조성의 마그마가 지속해서 분출하여 초기에 분출한 마그마로 기원한 암석이 매몰 과정을 거치면서 느린 냉각 속도의 열 변성 과정을 경험한다. 따라서 T080-C6 암편은 모천체에서 현무암질 조성의 마그마 분출이 활발한 지역에서 초기에 분출되어 두꺼운 용암층에 의해 매몰된 암석에서 기원하였고 매몰된 깊이가 집적 유크라이트와 유사하였을 것이다. 중립질 입상 변정질 암편의 서로 수직한 방향의 용리 엽리로 이루어진 용리 조직은 현무암질 유크라이트 기원 암편의 다양한 조직과 함께 해당 지역의 화성 활동과 각력화 활동이 활발하였음을 보여준다.

## 제 6 장 결론(Conclusion)

TIL 07014 는 폴리믹트 유크라이트로 다양한 종류의 암편으로 구성된다 (박창근, 2009). 본 연구에서는 TIL 07014 박편 3 개에서 확인된 18 개의 암편을 기질부와 구분하였으며, 암석학적 특징 및 광물 화학 조성을 바탕으로 총 9 종류(구과상 조직 암편, 준오피틱 조직 암편, 입간조직 암편, 세립질 입상 변정질 조직 암편, 중립질 입상 변정질 암편, 각력암질 암편, 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편, 침상 모양의 휘석으로 구성된 암편, 철-니켈 금속 철 함유 암편)로 분류하였다.

이들 9 종류의 암편의 기원을 알기 위해 광물 조성, 암편의 전암 화학 조성, 암편의 조직 등을 기준에 잘 알려진 현무암질 유크라이트 및 집적 유크라이트와 비교하였다. 암편 마다 평형화된 휘석의 조성에 따라 9 종류의 암편은 (1) En 함량이 상대적으로 높은( $En_{41-49}$ ) 그룹, (2) En 함량이 상대적으로 낮은( $En_{28-30}$ ) 그룹과, (3) 그 중간에 해당되는 ( $En_{33-38}$ ) 그룹으로 나누어진다. En 함량이 상대적으로 높은 그룹에 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편이 속하며, En 함량이 상대적으로 낮은 그룹에는 세립질 입상 변정질 암편이 속한다. 2 종류의 암편을 제외한 구과상 조직 암편, 준오피틱 조직 암편, 입간조직 암편, 중립질 입상 변정질 암편, 각력암질 암편, 철-니켈 금속 철 함유 암편들은 중간 조성 그룹에 해당된다.

En 함량이 상대적으로 높은 그룹( $En_{41-49}$ )에 속하는 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편의 경우, 휘석의 조성은 일반적인 현무암질 유크라이트( $En_{32.2-45.8}$ , Mittlefehldt, 2015)와 집적 유크라이트( $En_{48.5-66.1}$ , Mittlefehldt, 2015) 모두에 해당되고 사장석의 조성( $An_{90.8-95.1}$ )은 집적 유크라이트( $An_{90-95}$ , Mittlefehldt, 2015)에 해당된다. 전암 화학 조성은 집적 유크라이트와 현무암질 유크라이트 조성의 중간에 해당된다 (Fig. 4.31). 일반적으로 침상형의 휘석 결정은 급랭 과정을 거쳐서 생성된다 (van Dronghen et al., 2016). 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편의 침상형의 Ca 함량이 낮은 휘석은 해당

암편이 현무암질 유크라이트 기원임을 지시한다. 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편의 광물 화학 조성, 전암 화학 조성, 암편의 암석학적 특징 등이 서로 다른 기원을 지시하고 있다. 따라서 본 연구에서는 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편은 조직, 광물 화학 조성, 전암 화학 조성의 특징들이 나머지 암편과 구분되어 다른 기원을 가졌을 것으로 생각되나, 그 기원을 명확하게 규명하지 못하였다.

일반적으로 세립질 입상 변정질 암편은 충격 용융 액 또는 세립질의 현무암질 유크라이트가 변성 작용을 받아 생성된 것으로 알려져 있다 (e.g. Buchanan *et al.*, 2000b; Patzer *et al.*, 2003; van Dronghen *et al.*, 2016). En 함량이 낮은 그룹에 속하는 세립질 입상 변정질 암편은 암편의 휘석 조성( $En_{28-30}$ )은 일반적인 현무암질 유크라이트 조성에 벗어나고, 후기 정출 광물인 실리카 동질이상체, 트로일라이트, Ca-인회석이 암편에서 많은 양(실리카 동질이상체: 14 vol.%, 트로일라이트: 2 vol.%)을 차지하고 자형 내지 반자형으로 산출 된다. 암편을 구성하는 휘석에서 열 변성 작용을 지시하는 클라우딩 조직과 용리 조직의 발달은 미약하다. 이러한 특징들은 충격 용융 액 기원으로 설명이 가능하다. 부분 용융 과정을 거쳐 생성된 충격 용융 액은 분화된 마그마의 조성에 해당되어 세립질 입상 변정질 암편의 철 함량이 부화된 특징과 후기 정출 광물(실리카 동질이상체, 트로일라이트, Ca-인회석)의 산출 양상을 설명할 수 있다. 또한 충격 용융 액이 생성 이후 급랭 과정을 거친 후 변성 작용을 거쳐 재결정화되는 과정으로 휘석 결정에서 용리 조직 및 클라우딩 조직 발달이 미약한 점을 설명할 수 있다.

중간 조성( $En_{33-38}$ ) 그룹에 속하는 암편들의 조직은 현무암질 유크라이트에서 주로 관찰되는 조직이며, 암편의 광물 화학 조성, 전암 화학 조성 모두 현무암질 유크라이트에 해당된다. 중간 그룹의 암편들은 전암 화학 조성 결과에 따라 중간 조성 그룹의 암편들은 다시 메인 그룹의 현무암질 유크라이트와 스테넨 그룹의 현무암질 유크라이트로 세분된다. 이 중 전자에 속하는 암편 중 한 암편은 금속 철 함량(~5 vol.%)이 높고 금속 철의 니켈 함량(3~35 wt.%)이 L 또는 LL 타입의 콘드라이트에

해당되어 콘드라이트 기원으로 구분하였다 (Fig. 4.28~4.29). 정리하면 9 종류의 암편들은 암석학적 특징 및 광물 조성 등에 의해, 기존에 연구된 1) 스테넨 그룹 현무암질 유크라이트 기원, 2) 메인 그룹 현무암질 유크라이트 기원, 3) 충격 용융 액 기원 및 4)콘드라이트 기원의 암석과 대비되며, 5) 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편으로 총 5 개의 기원으로 묶어지며 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편의 경우 본 연구에서는 기원을 규명하지 못하였다.

총 18 개의 암편들 중 대부분(12 개)이 메인 그룹의 현무암질 유크라이트에 속한다. 따라서 TIL 07014 가 모천체에서 기원한 장소는 메인 그룹의 현무암질 유크라이트가 우세한 지역으로 생각되며, 이 지역으로 스테넨 그룹의 현무암질 유크라이트 기원 암편, 충격 용융 액 기원 암편, 콘드라이트 기원 암편, 막대 모양의 휘석으로 구성된 암편들이 이동한 뒤 혼재되어 현재의 TIL 07014 를 생성하였을 것이다.

입간 조직 암편에 해당되는 암편(T079-C1)의 광물 화학 조성은 현무암질 유크라이트에 해당하나, 박창근(2009)에 따르면 전암 희토류 원소 함량은 집적 유크라이트에 해당한다. 암편의 구성 광물 함량 비, 구성 광물 크기 등의 T079-C1 암편의 특징은 부분 용융 과정으로 생성된 용액이 분별 결정화 과정을 거치는 것으로 설명할 수 있다. 이 경우 T079-C1 암편의 전암 희토류 원소 함량도 쥬비나스 유크라이트(Juvinas eucrite)조성의 기원암을 10%~20% 부분 용융 후 85%~95%의 분별 결정 과정을 거치는 조건으로 재현할 수 있었다.



## 참 고 문 헌

- 박창근 (2009) 유크라이트 TIL 07014의 변성 및 각력화 작용. 서울대학교 석사 학위 논문
- 최변각 (2009b) 운석의 분류와 암석학적, 지구화학적 특징. 지질학회지 45, 173-186.
- 최변각, 박창근, 안인수 그리고 이종익 (2009a) 제 1, 2, 3 차 대한민국 남극운석의 분류와 암석학적, 지구화학적 특징. 지질학회지 45, 593-605.
- Afiattalab, F. and Wasson, J.T. (1980) Composition of the metal phases in ordinary chondrites: Implications regarding classification and metamorphism. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 44, 4314-45-443446.
- Andersen, D.J., Lindsley, D.H. and Davidson, P.M. (1993) QUILF: A pascal program to assess equilibria among Fe- Mg- Mn- Ti oxides, pyroxenes, olivine, and quartz. *Computers & Geosciences* 19, 1333-1350.
- Barrat, J., Blichert-TOFT, J., Gillet, P. and Keller, F. (2000) The differentiation of eucrites: the role of in situ crystallization. *Meteoritics & Planetary Science* 35, 1087-1100.
- Barrat, J., Yamaguchi, A., Greenwood, R., Bohn, M., Cotten, J., Benoit, M. and Franchi, I. (2007) The Stannern trend eucrites: Contamination of main group eucritic magmas by crustal partial melts. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 71, 4108-4124.
- Barrat, J.A., Jambon, A., Bohn, M., Blichert-Toft, J., Sautter, V., Göpel, C., Gillet, P., Boudouma, O. and Keller, F. (2003) Petrology and geochemistry of the unbrecciated achondrite Northwest Africa 1240 (NWA 1240): an HED parent

- body impact melt. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 67, 3959–3970.
- Barrat, J.A., Yamaguchi, A., Bunch, T.E., Bohn, M., Bollinger, C. and Ceuleneer, G. (2011) Possible fluid-rock interactions on differentiated asteroids recorded in eucritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 75, 3839–3852.
- Bischoff, A., Scott, E.R., Metzler, K. and Goodrich, C.A. (2006) Nature and origins of meteoritic breccias. *Meteorites and the early solar system II*, 679–712.
- Brenan, J., Neroda, E., Lundstrom, C., Shaw, H., Ryerson, F. and Phinney, D. (1998) Behaviour of boron, beryllium, and lithium during melting and crystallization: constraints from mineral-melt partitioning experiments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 62, 2129–2141.
- Buchanan, P.C., Lindstrom, D.J., Mittlefehldt, D.W., Koeberl, C. and Remold, W.U. (2000a) The South African polymict eucrite Macibini. *Meteoritics & Planetary Science* 35, 1321–1331.
- Buchanan, P.C., Mittlefehldt, D., Hutchison, R., Koeberl, C., Lindstrom, D. and Pandit, M. (2000b) Petrology of the Indian eucrite Piplia Kalan. *Meteoritics & Planetary Science* 35, 609–615.
- Carlson, R.W. and Lugmair, G.W. (2000) Timescales of planetesimal formation and differentiation based on extinct and extant radioisotopes. *Origin of the Earth and Moon*, 25–44.
- Clayton, R.N. and Mayeda, T.K. (1996) Oxygen isotope studies of achondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60, 1999–2017.

- Consolmagno, G.J. and Drake, M.J. (1977) Composition and evolution of the eucrite parent body: evidence from rare earth elements. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 41, 1271-1282.
- Delaney, J., Prinz, M., Nehru, C. and Harlow, G. (1981) A new basalt group from howardites: mineral chemistry and relationships with basaltic achondrites, Lunar and Planetary Science Conference, pp. 211-213.
- Delaney, J., Prinz, M. and Takeda, H. (1984) The polymict eucrites, Lunar and Planetary Science Conference Proceedings, p. 251.
- Drake, M. (2000) The Eucrite/Vesta Story. *Meteoritics and Planetary Science Supplement* 35, 49.
- Drake, M.J. (1975) The oxidation state of europium as an indicator of oxygen fugacity. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 39, 55-64.
- Duke, M.B. and Silver, L.T. (1967) Petrology of eucrites, howardites and mesosiderites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 31, 1637-1665.
- Evensen, N., Hamilton, P.J. and O'Nions, R. (1978) Rare-earth abundances in chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 42, 1199-1212.
- Fandrich, R., Gu, Y., Burrows, D. and Moeller, K. (2007) Modern SEM-based mineral liberation analysis. *International Journal of Mineral Processing* 84, 310-320.
- Fuhrman, M. and Papike, J. (1982) Howardites and polymict eucrites: Regolith samples from the eucrite parent body-Petrology of Bholgati, Bununu, Kapoeta, and ALHA 76005, Lunar and Planetary Science Conference Proceedings, pp. 1257-1279.
- GARDNER-VANDY, K.G., Hill, D.H., Lauretta, D.S., Goreva, Y.S., Domanik, K.J.,

- Greenwood, R.C., Franchi, I.A. and Killgore, M. (2011) Petrology and geochemistry of the Northwest Africa 3368 eucrite. *Meteoritics & Planetary Science* 46, 1052–1070.
- Gooley, R. and Moore, C. (1976) Native metal in diogenite meteorites.[Fe, Co, and Ni]. *Am. Mineral.*;(United States) 61.
- Grossman, L., Olsen, E., Davis, A.M., Tanaka, T. and MacPherson, G.J. (1981) The Antarctic achondrite ALHA 76005: a polymict eucrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 45, 1267–1279.
- Harlow, G. and Klimentidis, R. (1980) Clouding of pyroxene and plagioclase in eucrites–Implications for post-crystallization processing, Lunar and Planetary Science Conference Proceedings, pp. 1131–1143.
- Herd, C.D., Treiman, A.H., Mckay, G.A. and Shearer, C.K. (2004) The behavior of Li and B during planetary basalt crystallization. *American Mineralogist* 89, 832–840.
- Howard, L., Domanik, K., Drake, M. and Mittlefehldt, D. (2002) Petrology of Antarctic Eucrites PCA 91078 and PCA 91245, Lunar and Planetary Science Conference.
- Hsu, W. and Crozaz, G. (1996) Mineral chemistry and the petrogenesis of eucrites: I. Noncumulate eucrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60, 4571–4591.
- Hsu, W. and Crozaz, G. (1997) Mineral chemistry and the petrogenesis of eucrites: II. Cumulate eucrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61, 1293–1302.
- Ikeda, Y. and Takeda, H. (1985) A model for the origin of basaltic achondrites based on the Yamato 7308 howardite. *Journal of Geophysical Research: Solid*

Earth 90.

- Ishii, T. and Takeda, H. (1974) Inversion, decomposition and exsolution phenomena of terrestrial and extraterrestrial pigeonites. *Mem. Geol. Soc. Japan* 11, 19-36.
- Jones, J.H. (1995) Experimental trace element partitioning. *Rock Physics & Phase Relations: A Handbook of Physical Constants*, 73-104.
- Lee, M.R. and Bland, P.A. (2004) Mechanisms of weathering of meteorites recovered from hot and cold deserts and the formation of phyllosilicates. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 68, 893-916.
- Llorca, J., Casanova, I., Trigo-Rodríguez, J.M., Madiedo, J.M., Roszjar, J., Bischoff, A., Ott, U., Franchi, I.A., Greenwood, R.C. and Laubenstein, M. (2009) The Puerto Lápice eucrite. *Meteoritics & Planetary Science* 44, 159-174.
- Lorenz, K.A., Nazarov, M.A., Kurat, G., Brandstaetter, F. and Ntaflos, T. (2007) Foreign meteoritic material of howardites and polymict eucrites. *Petrology* 15, 109-125.
- Lydon, J. (2005) The measurement of the modal mineralogy of rocks from SEM imagery: the use of Multispec® and ImageJ freeware. *Geological Survey of Canada, Open File* 4941, 37.
- Maloy, A.K. and Treiman, A.H. (2007) Evaluation of image classification routines for determining modal mineralogy of rocks from X-ray maps. *American Mineralogist* 92, 1781-1788.
- Mayne, R.G., McSween Jr, H.Y., McCoy, T.J. and Gale, A. (2009) Petrology of the

- unbrecciated eucrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73, 794–819.
- McSween Jr, H.Y., Mittlefehldt, D.W., Beck, A.W., Mayne, R.G. and McCoy, T.J. (2012) HED meteorites and their relationship to the geology of Vesta and the Dawn mission, *The Dawn Mission to Minor Planets 4 Vesta and 1 Ceres*. Springer, pp. 141–174.
- Metzler, K., Bober, K., Palme, H., Spettel, B. and Stöffler, D. (1995) Thermal and impact metamorphism on the HED parent asteroid. *Planetary and Space Science* 43, 499–525.
- Misawa, K., Yamaguchi, A. and Kaiden, H. (2005) U–Pb and <sup>207</sup>Pb–<sup>206</sup>Pb ages of zircons from basaltic eucrites: Implications for early basaltic volcanism on the eucrite parent body. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69, 5847–5861.
- Mittlefehldt, D., Berger, E. and Le, L. (2017) Petrology of Anomalous Mafic Achondrite Polymict Breccia Pasamonte.
- Mittlefehldt, D.W. (2015) Asteroid (4) Vesta: I. The howardite-eucrite-diogenite (HED) clan of meteorites. *Chemie der Erde – Geochemistry* 75, 155–183.
- Mittlefehldt, D.W. and Lindstrom, M.M. (1993) Geochemistry and petrology of a suite of ten Yamato HED meteorites. *Antarctic Meteorite Research* 6, 268.
- Moine, B., Seddiki, A., Renac, C., Bascou, J. and Cottin, J. (2006) STUDY OF NORTHWEST AFRICA 4269: A METAL-RICH LIKE “EUCRITE” BASALTIC ACHONDRITE. *Meteoritics and Planetary Science Supplement* 41, 5390.
- Norman, M., Garcia, M.O. and Pietruszka, A.J. (2005) Trace-element distribution coefficients for pyroxenes, plagioclase, and olivine in evolved tholeiites from the 1955 eruption of Kilauea Volcano, Hawai’i, and petrogenesis of



- differentiated rift-zone lavas. *American Mineralogist* 90, 888-899.
- Nyquist, L., Bogard, D., Takeda, H., Bansal, B., Wiesmann, H. and Shih, C.-Y. (1997) Crystallization, recrystallization, and impact-metamorphic ages of eucrites Y792510 and Y791186. *Geochimica et cosmochimica acta* 61, 2119-2138.
- Palme, H., Wlotzka, F., Spettel, B., Dreibus, G. and Weber, H. (1988) Camel Donga: a eucrite with high metal content. *Meteoritics* 23, 49-57.
- Papike, J., Karner, J. and Shearer, C. (2003) Letter. Determination of planetary basalt parentage: A simple technique using the electron microprobe. *American Mineralogist* 88, 469-472.
- Patzer, A., Hill, D.H. and Boynton, W.V. (2003) New eucrite Dar al Gani 872: Petrography, chemical composition, and evolution. *Meteoritics & Planetary Science* 38, 783-794.
- Phinney, W. and Morrison, D. (1990) Partition coefficients for calcic plagioclase: Implications for Archean anorthosites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 54, 1639-1654.
- Pun, A. and Papike, J.J. (1996) Unequilibrated eucrites and the equilibrated Juvinas eucrite: Pyroxene REE systematics and major, minor, and trace element zoning. *American Mineralogist* 81, 1438-1451.
- Righter, K. and Shearer, C. (2003) Magmatic fractionation of Hf and W: constraints on the timing of core formation and differentiation in the Moon and Mars. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 67, 2497-2507.
- Schwandt, C.S. and McKay, G.A. (1998) Rare earth element partition coefficients from enstatite/melt synthesis experiments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*

62, 2845-2848.

- Seddiki, A., Moine, B., Cottin, J.Y., Bascou, J., Godard, M., Faure, F., Bourot-Denise, M. and Remaci, N. (2012) A mineralogical and geochemical study of polymict eucrite discovered in Sahara of southwest Algeria. *Arabian Journal of Geosciences* 6, 3175-3184.
- Shukla, A., Shukla, P., Suthar, K., Bhandari, N., Vaya, V., Sisodia, M., Roy, S.S., Rao, K. and Rajawat, R. (1997) Piplia Kalan eucrite: Fall, petrography and chemical characteristics. *Meteoritics & Planetary Science* 32, 611-615.
- Singerling, S.A., Modi, A.L., McFerrin, B., Worsham, E.A., McSween, H.Y., Rumble, D., Tanaka, R. and Taylor, L.A. (2013) Two new eucrite breccias from Northwest Africa. *Meteoritics & Planetary Science* 48, E1-E9.
- Stöffler, D., Keil, K. and Edward R.D, S. (1991) Shock metamorphism of ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 55, 3845-3867.
- Stolper, E. (1977) Experimental petrology of eucritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 41, 587-611.
- Sun, C.-o., Williams, R.J. and Shine-soon, S. (1974) Distribution coefficients of Eu and Sr for plagioclase-liquid and clinopyroxene-liquid equilibria in oceanic ridge basalt: an experimental study. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 38, 1415-1433.
- Takeda, H. (1979) A layered-crust model of a howardite parent body. *Icarus* 40, 455-470.
- Takeda, H. (1991) Comparisons of Antarctic and non-Antarctic achondrites and possible origin of the differences. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 55, 35-

47.

- Takeda, H. (1997) Mineralogical records of early planetary processes on the howardite, eucrite, diogenite parent body with reference to Vesta. *Meteoritics & Planetary Science* 32, 841-853.
- Takeda, H. and Graham, A.L. (1991) Degree of equilibration of eucritic pyroxenes and thermal metamorphism of the earliest planetary crust. *Meteoritics* 26, 129-134.
- Takeda, H., Wooden, J., Mori, H., Delaney, J., Prinz, M. and Nyquist, L. (1983) Comparison of Yamato and Victoria Land polymict eucrites: A view from mineralogical and isotopic studies. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 88.
- van Drongelen, K.D., Rumble, D. and Tait, K.T. (2016) Petrology and oxygen isotopic compositions of clasts in HED polymict breccia NWA 5232. *Meteoritics & Planetary Science*.
- Warren, P.H., Isa, J., Ebihara, M., Yamaguchi, A. and Baecker, B. (2017) Secondary-volatiles linked metallic iron in eucrites: The dual-origin metals of Camel Donga. *Meteoritics & Planetary Science*, n/a-n/a.
- Weisberg, M.K., McCoy, T.J. and Krot, A.N. (2006) Systematics and evaluation of meteorite classification. *Meteorites and the early solar system II* 19.
- Wittmann, A., Hiroi, T., Ross, D.K., Herrin, J.S., Rumble III, D. and Kring, D.A. (2011) Eucrite Impact Melt NWA 5218-Evidence for a Large Crater on Vesta.
- Yamaguchi, A., Barrat, J.-A., Greenwood, R., Shirai, N., Okamoto, C., Setoyanagi, T., Ebihara, M., Franchi, I. and Bohn, M. (2009) Crustal partial melting on

- Vesta: evidence from highly metamorphosed eucrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73, 7162–7182.
- Yamaguchi, A., Barrat, J.-A., Shirai, N., Okamoto, C., Setoyanagi, T. and Ebihara, M. (2007) Highly Metamorphosed Eucrites, A-87272 and DaG945: Residues After Crustal Partial Melting. *Meteoritics and Planetary Science Supplement* 42, 5200.
- Yamaguchi, A., Okamoto, C. and Ebihara, M. (2006) The origin of FeNi-metals in eucrites and implication for impact history of the HED parent body, 37th Annual Lunar and Planetary Science Conference, p. 1678.
- Yamaguchi, A., Takeda, H., Bogard, D.D. and Garrison, D. (1994) Textural variations and impact history of the Millbillillie eucrite. *Meteoritics* 29, 237–245.
- Yamaguchi, A., Taylor, G.J. and Keil, K. (1996) Global Crustal Metamorphism of the Eucrite Parent Body. *Icarus* 124, 97–112.
- Yamaguchi, A., Taylor, G.J. and Keil, K. (1997) Metamorphic history of the eucritic crust of 4 Vesta. *Journal of Geophysical Research: Planets* 102, 13381–13386.
- Yamaguchi, A., Taylor, G.J., Keil, K., Floss, C., Crozaz, G., Nyquist, L.E., Bogard, D.D., Garrison, D.H., Reese, Y.D. and Wiesmann, H. (2001) Post-crystallization reheating and partial melting of eucrite EET90020 by impact into the hot crust of asteroid 4Vesta ~ 4.50 Ga ago. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 65, 3577–3599.

# Abstract

## Classification and petrology of clasts in Thiel Mountains 07014 eucrite

Moon, Jong han

Science Education (Earth Science)

Graduate School

Seoul National University

Thiel Mountains 07014 (TIL 07014) is a polymict eucrite that comprises various clasts (Park, 2009). The purposes of this study are to classify of various clasts in TIL 07014 by review of clast textures, mineral compositions and bulk compositions, and to compare these features of clasts with those of previous studied eucrites or clasts in howardite or polymict eucrite. Eighteen clasts were identified out of matrix from three thin sections.

Mainly based on their textures, the clasts were classified in to 9 textural types, i.e., variolitic clasts, subophitic clasts, intergranular clasts, fine-grained granoblastic clast, medium-grain granoblastic clasts, lath-shaped pyroxene clast, acicular-shaped pyroxene clasts, and Fe-Ni metal bearing clast.

In order to understand the origins of these 9 textural types, their textures,

mineral compositions and bulk compositions were compared with each other and with previously studied eucrites and then 9 types were classified into 5 groups.

1) Stannern group basaltic eucrite having pyroxene composition of typical basaltic eucrite and high Na/Al(mole) ratio ( $>0.08$ ) in bulk composition: one of two variolitic type clasts belongs to this group (1 clast).

2) Main group basaltic eucrite having pyroxene composition of typical basaltic eucrite and medium Na/Al (mole) ratio ( $0.05-0.07$ ) in bulk composition: one of two variolitic type clasts, subophitic type clasts, intergranular type clasts, breccia type clasts and medium-grain granoblastic type clasts belong to this group (12 clasts).

3) Recrystallized impact melts having Fe-enriched pyroxene composition and high abundances of subhedral or euhedral silica troilite and Ca-phosphate: fine-grained granoblastic type clast belongs to this group. (1clast).

4) Chondrite fragments having higher abundance and Ni content of Fe-Ni metal than those of eucrites: Fe-Ni metal bearing clast belongs to this group (1 clast) and is related to L or LL type chondrite.

5) The pyroxene compositions of the lath-shaped pyroxene clast (1 clast) and acicular-shaped pyroxene clasts (2 clasts) are both those of basaltic eucrite and cumulate eucrite, and the bulk compositions of two type clasts also correspond to the boundaries between basaltic eucrite and cumulate eucrite. Therefore, this study cannot identify the origin of three clasts clearly. Most clasts (12 clasts) fall within main group basaltic eucrite, so main group basaltic eucrite is also dominant in the place where TIL 07014 underwent brecciation processes in the parent body.

T079-C1 clast (intergranular type clasts having the pyroxene composition of



basaltic eucrite) has the element earth(REE) patterns of cumulate eucrites (Park, 2009). Various conditions were examined in order to model the observed REE pattern of the clast. The REE composition of T079–C1 matches with rock formed by 85–90% of fractionation crystallization of magma that was produced by 10–20% partial melting of the eucritic rock having composition of Juvinas eucrite.

**Keywords:** Polymict eucrite, breccia, clast

**Student number:** 2014–22861